

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Ciclo Optativo de Profesionalización en Gestión de Calidad y Auditoria Ambiental



“EFECTOS DE LA APLICACIÓN DE LOS LODOS PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES SOBRE EL SUELO”

Presentado por:

SANDRA GÁLVEZ CASTAGNINO

**Trabajo de Titulación para Optar el Título de:
INGENIERO AMBIENTAL**

Lima – Perú

2014

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo me gustaría agradecer a mi mamá por ser la persona que me ha acompañado siempre, por su apoyo y motivación, y ha logrado en mí que pueda terminar mis estudios con éxito.

A mi papá, que por él elegí la carrera que seguí y a toda mi familia, que me han motivado durante mi formación profesional.

De igual manera quiero agradecer a mi asesor, el profesor Sady García, que con su ayuda pude culminar este trabajo.

A un amigo Carlos Leal, por su apoyo en todo momento y a mis amigos que trabajaron en el Proyecto C.H. Cheves, que de algún y otra manera, me ayudaron a realizar este trabajo.

Y en especial a Jaime Cáceres, por ser ahora parte de mi vida, por su paciencia y apoyo que me ha dado desde el día en que lo conocí.

ÍNDICE

RESUMEN	10
SUMMARY	11
I. INTRODUCCION	12
II. JUSTIFICACION	14
III. OBJETIVOS.....	15
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
IV. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	16
4.1 LODOS RESIDUALES.....	16
4.1.1 CLASIFICACIÓN DE LODOS RESIDUALES	16
4.1.2 CARÁCTERÍSTICAS DE LOS LODOS RESIDUALES	17
4.1.3 APLICABILIDAD	24
4.1.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE LODOS.....	27
4.1.5 IMPACTOS AMBIENTALES.....	28
4.1.6 CRITERIOS DE DISEÑO	29
4.2 MARCO LEGAL.....	31
V. MATERIALES Y METODOS	33
5.1 MATERIALES	33
5.1.1 UBICACIÓN.....	33
5.1.2 CONDICIONES CLIMÁTICAS	33
5.1.3 DETERMINACIÓN DE LOS LODOS RESIDUALES	33
5.1.4 DETERMINACIÓN DEL SUELO	34
5.1.4.1 CONTENIDO DE METALES TOTALES - SUELO	35

5.1.5 CULTIVOS INDICADORES	35
5.1.6 OTROS MATERIALES.....	35
5.2 METODOS	36
5.2.1 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LOS LODOS RESIDUALES	36
5.2.2 BIOENSAYOS DE FITOTOXICIDAD	39
5.2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	41
VI. RESULTADOS Y DISCUSIONES	42
6.1 CARACTERÍSTICAS DEL LOS LODOS RESIDUALES	42
6.2 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	43
6.2.1 CONTENIDO DE METALES EN EL SUELO.....	44
6.3 EFECTO DE LA APLICACIÓN DE LODOS SOBRE EL CRECIMIENTO.....	45
6.3.1 CULTIVO MAÍZ (<i>Zea mays</i> L.).....	46
6.3.2 CULTIVO FRIJOL (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	50
6.3.3 CULTIVO LECHUGA (<i>Lactuca sativa</i> L.).....	54
6.3.4 CULTIVO RABANO (<i>Raphanus sativus</i> L.)	59
6.4 ANÁLISIS DE BIOACUMULACIÓN DE METALES PESADOS (CADMIO)	62
6.5 CUANTIFICACIÓN DE COLIFORMES FECAL Y TOTALES EN EL SUSTRATO	65
VII. CONCLUSIONES.....	67
VIII. RECOMENDACIONES	69
IX. BIBLIOGRAFÍA.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Concentración máxima de metales establecidos por la EPA en la norma 40 CFR 503 para biosólidos que serán dispuestos en suelos.....	21
Tabla 2: Criterios microbiológicos para la caracterización de lodos residuales....	23
Tabla 3: Escenarios típicos de aplicación de biosólidos.....	31
Tabla 4: Tratamientos correspondientes a mezclas de suelo y lodos residuales (%).	40
Tabla 5: Características químicas de los lodos residuales.....	42
Tabla 6: Parámetros microbiológicos de los lodos residuales.....	43
Tabla 7: Características químicas del suelo.....	44
Tabla 8: Concentración de metales y no metales (elementos traza) considerado como sitios excesivamente fitotóxicos en suelo superficial y en plantas. Fuente: EPA, 1992.....	44
Tabla 9: Concentraciones totales de Cadmio (Cd) y Plomo (Pb), utilizadas como niveles de referencia para la identificación de suelos contaminados en algunos países del mundo (Hernández, 2011).	45
Tabla 10: Efecto de la proporción de lodos residuales sobre el número de plantas germinadas, la altura a los 10 y 20 días después de la siembra (dds) y la producción de biomasa de plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L.).	46
Tabla 11: Efecto de la proporción de lodos residuales sobre el número de plantas germinadas, la altura a los 10 y 20 días después de la siembra (dds) y la producción de biomasa de plantas de frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).	50
Tabla 12: Efecto de la proporción de lodos residuales sobre el número de plantas germinadas, la altura a los 10, 20 y 37 días después de la siembra (dds) y la producción de biomasa de plantas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.).	54

Tabla 13: Efecto de la proporción de lodos residuales sobre el número de plantas germinadas, la altura a los 10 y 20 días después de la siembra (dds) y la producción de biomasa de plantas de rábano (<i>Raphanus sativus</i> L.).	59
Tabla 14: Bioacumulación de metales pesados, Cd (mg/kg) en las hojas de las plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L.), frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) y rábano (<i>Raphanus sativus</i> L.) después del crecimiento.....	63
Tabla 15: Concentración de coliformes fecales y totales en el sustrato	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Lodo residual de la planta de tratamiento de efluentes domésticos por aireación extendida (lodos activados).....	34
Figura 2: Lodo residual después de haber pasado por el proceso de trituración.	34
Figura 3: Pesaje de muestras en el laboratorio a los 20 días de haber germinado las plantas.	41
Figura 4: Germinación (Nº) de semillas de maíz (<i>Zea mays</i> L.), sembradas en mezclas de lodo residual y suelo.....	46
Figura 5: Altura del maíz (<i>Zea mays</i> L.) durante 10 y 20 días en las distintas mezclas de lodo residual y suelo.....	47
Figura 6: Cultivo de maíz (<i>Zea mays</i> L.) utilizando el tratamiento T4 (0:100) a los 10 días.	48
Figura 7: Cultivo de maíz (<i>Zea mays</i> L.) utilizando el tratamiento T0 (100:0) a los 10 días.	48
Figura 8: Cultivo de maíz (<i>Zea mays</i> L.) a los 20 días.....	48
Figura 9: Biomasa de las plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L.) durante su crecimiento en las distintas mezclas de lodo residual y suelo.....	49
Figura 10: Germinación (Nº) de semillas de frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.), sembradas en mezclas de lodo residual y suelo.	50
Figura 11: Altura del frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) durante 10 y 20 días en las distintas mezclas de lodo residual y suelo.	51
Figura 12: Cultivo de frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) utilizando el tratamiento T2 (50: 50) a los 10 días.....	52
Figura 13: Cultivo de frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) utilizando el tratamiento T4 (0:100) a los 10 días.....	52
Figura 14: Biomasa de las plantas del frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) durante su crecimiento en las distintas mezclas de lodo residual y suelo.....	53

Figura 15: Germinación (N°) de semillas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.), sembradas en mezclas de lodo residual y suelo.	54
Figura 16: Altura de cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) durante 10, 20 y 37 días en las distintas mezclas de lodo residual y suelo.....	55
Figura 17: Cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) utilizando el tratamiento T0 (100:0) a los 20 días.....	56
Figura 18: Cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) utilizando el tratamiento T4 (0:100) a los 20 días.....	56
Figura 19: Cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) utilizando el tratamiento T0 (100:0) a los 37 días.....	57
Figura 20: Cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) utilizando el tratamiento T4 (0:100) a los 37 días.....	57
Figura 21: Biomasa de las plantas del lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) durante su crecimiento en las distintas mezclas de lodo residual y suelo.....	58
Figura 22: Germinación (N°) de semillas de rábano (<i>Raphanus sativus</i> L.), sembradas en mezclas de lodo residual y suelo.	59
Figura 23: Altura del rábano (<i>Raphanus sativus</i> L.) durante 10 y 20 días en las distintas mezclas de lodo residual y suelo.	60
Figura 24: Cultivo de rábano (<i>Raphanus sativus</i> L.) utilizando el tratamiento T0 (100:0) a los 10 días.....	61
Figura 25: Cultivo de rábano (<i>Raphanus sativus</i> L.) utilizando el tratamiento T3 (25:75) a los 10 días.....	61
Figura 26: Biomasa de las plantas de rábano (<i>Raphanus sativus</i> L.) durante su crecimiento en las distintas mezclas de lodo residual y suelo.....	62
Figura 27: Concentración de Cd (mg/kg) en el follaje de plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L.), frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) y rábano (<i>Raphanus sativus</i> L.).	64
Figura 28: Concentración de coliformes totales (NMP/g) en el sustrato	65

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1	Informe de análisis de materia orgánica (lodo activado).
Anexo 2	Informe de ensayo de coliformes totales y fecales.
Anexo 3	Análisis de suelos: caracterización.
Anexo 4	Informe de ensayo de agua.
Anexo 5	Informe de análisis foliar.

ÍNDICE DE SIGLAS

EPA	Agencia de Protección Ambiental (<i>Environmental Protection Agency</i>).
LASPAF	Laboratorio de Análisis de Suelos Plantas, Aguas y Fertilizantes.
UNALM	Universidad Nacional Agraria La Molina.
CFR	Código de Reglamentos Federales (<i>Code of Federal Regulations</i>).
NMP	Número más probable.
UFP	Unidades formadoras de placa.

RESUMEN

El presente trabajo fue realizado en el pueblo de Mirahuay, ubicado en la provincia de Oyón, Departamento de Lima, durante los meses de septiembre de 2012 a enero de 2013.

El objetivo principal de este estudio es evaluar el efecto que produce la aplicación de lodos residuales sobre el suelo y el crecimiento de las plantas utilizando cuatro cultivos: maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), lechuga (*Lactuca sativa* L.) y rábano (*Raphanus sativus* L.). Se usaron muestras representativas de lodos residuales obtenidos de la planta de tratamiento de efluentes domésticos por aireación extendida (lodos activados), ubicada en la sede del Club Regatas Lima, en el km 20.4 de la carretera Panamericana Sur. Se prepararon mezclas con los siguientes tratamientos: 25%, 50%, 75% y 100% de lodos (T1, T2, T3 y T4, respectivamente). Asimismo, se preparó un Control (T0), conteniendo solo suelo proveniente de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Cada tratamiento se hizo por triplicado.

Para el análisis de los resultados se utilizó el paquete *Agricolae* del ambiente para computación estadística R (R Core Team, 2012). Los datos obtenidos de las variables evaluadas (peso fresco y seco), fueron sometidos al análisis de varianza (ANVA) sin transformación. Posteriormente, fueron comparados mediante la prueba de comparación de medias HSD de Tukey al 95% de confianza.

Palabra clave: lodos residuales.

SUMMARY

The current study was carried out in Mirahuay town during September 2012 and January 2013. Mirahuay is located in Oyón Province, Lima Department.

The main purpose of this study is to evaluate the effects of sewage sludge application in soil and plant growth tested in four crops: corn (*Zea mays* L.), (*Phaseolus vulgaris* L.), lettuce (*Lactuca sativa* L.) and radish (*Raphanus sativus* L.). Representative samples of sewage sludge were collected from the wastewater treatment plant using extended aeration (activated sludge). The sewage treatment plant is located at the Regatas Lima Club; 20.4 km Panamericana Sur Road. Sewage sludge treatments were prepared as follows: 25%, 50%, 75% and 100% (T1, T2, T3 and T4). In addition, a control sample (T0) was prepared only with soil from the National Agrarian University - La Molina (UNALM). All treatments were replicated three times.

Data were analyzed using the *Agricolae* package for the R system (R Core Team, 2012). Analysis of variance (ANVA) was used to evaluate the significance of each parameter (dry and wet weight). In addition, data were compared among different treatments using HSD Tukey test at the 95% confidence level.

Key words: sewage sludge.

I. INTRODUCCION

La agricultura moderna es dependiente del uso de insumos externos, como los fertilizantes. Dado que la producción de fertilizantes sintéticos depende del consumo de petróleo, su precio es directamente dependiente del precio internacional del crudo. El incremento de los precios en los fertilizantes, debido a la crisis energética resulta por lo tanto, un incremento en los precios de los alimentos. Esto exige la exploración de fuentes alternativas a ser empleadas en la fertilización de los cultivos.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales generan gran cantidad de lodos sólidos. Estos requieren ser dispuestos, generando costos. Los lodos sin embargo, vienen siendo ensayados en diferentes regiones como fuentes de nutrientes para los cultivos. Por este motivo, se han buscado soluciones y alternativas, como el uso de los lodos en la agricultura.

La aplicación de los lodos al suelo tiene varios propósitos. Los lodos mejoran las propiedades físicas del suelo, tales como: la agregación, porosidad y capacidad de retención de agua; las cuales a su vez brindan condiciones más favorables para el crecimiento de las raíces e incrementan la tolerancia de la vegetación a la sequía. También proveen nutrientes esenciales, incluyendo el nitrógeno y el fósforo, así como el níquel, el zinc y el cobre (EPA/625/10-84-003, 1984). Además, mejora la estructura del suelo, el drenaje, la porosidad, ayuda a prevenir la erosión y favorece el rendimiento (Álvarez, 2004).

El presente proyecto busca explorar el uso potencial de los lodos de plantas depuradoras de aguas residuales urbanas en la agricultura, teniendo en cuenta los límites fijados en la legislación sobre los metales pesados y contaminantes orgánicos. Debido a esto, se debe tener lo más bajo posible en metales pesados

y además evitar la lixiviación de los nitratos y nitrógeno orgánico (Álvarez, 2004).

El manejo adecuado de los lodos residuales será la clave para conservar una producción abundante, rentable y saludable. Por lo tanto, es importante conocerlo y saberlo manejar de una manera ecológica, garantizando su calidad productiva.

II. JUSTIFICACION

Los fertilizantes son utilizados para obtener mayor producción y para aumentar la calidad del cultivo. El uso indiscriminado de estos fertilizantes sintéticos es un factor importante de la contaminación del suelo, perjudicial para la microfauna existente en el suelo (Altamirano et al., 2006).

La utilización de los lodos se realiza para aprovechar su potencial fertilizante y sus características físicas, como enmienda para mejorar los suelos.

III. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el efecto del uso de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales por aireación extendida (lodos activados), como fuente orgánica para el crecimiento de las plantas.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el efecto de la aplicación de los lodos sobre el crecimiento de cuatro cultivos indicadores: maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), lechuga (*Lactuca sativa* L.) y rábano (*Raphanus sativus* L.) bajo condiciones de invernadero.
- Determinar el potencial de fitotoxicidad de los lodos medido por el porcentaje de germinación de las cuatro especies.
- Evaluar la absorción del cadmio presente en las hojas de las plantas indicadoras, después del crecimiento.

IV. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 LODOS RESIDUALES

Los lodos residuales o biosólidos son subproductos sólidos, semisólidos o líquidos generados durante el tratamiento de aguas servidas domiciliarias. Esto incluye, pero no se limita, a las escorias o sólidos removidos durante el tratamiento primario, secundario o terciario y cualquier material derivado de los lodos, excepto las gravillas o cenizas generadas durante el proceso de incineración (EPA/832-B-93-005, 1995).

Los biosólidos son principalmente materiales orgánicos, los cuales pueden ser utilizados en diversos usos beneficiosos, como por ejemplo la incorporación al suelo para abastecerlo de nutrientes y para reponer la materia orgánica mineralizada. Se pueden utilizar en terrenos agrícolas, bosques, campos de pastoreo, o en terrenos alterados que necesitan recuperación (EPA/832-F-00-064, 2000).

Generalmente los lodos no presentan las características adecuadas para su disposición final; por ello, el objetivo de cualquier tratamiento es adecuarlos a las condiciones necesarias para dicho fin (De Melo, 2001, citado por Falcón, 2005).

4.1.1 CLASIFICACIÓN DE LODOS RESIDUALES

La Norma 503 de la EPA, Estándares para la Aplicación y Disposición de Lodos de Aguas Residuales (*40 CFR Part 503 Rule: Standard for Use and Disposal of Sewage Sludge*) define dos tipos de biosólidos con respecto a la reducción de agentes patógenos, dependiendo del grado de tratamiento que hayan recibido:

- ❖ **Lodos Clase A:** aquellos sin restricciones sanitarias para su aplicación benéfica al suelo (coliformes fecales < 1.000 NMP/g de lodo). La EPA utiliza el término “Exceptional Quality Biosolids” (EQ) ó Biosólidos de Calidad Excepcional, a aquellos biosólidos que reúne los requisitos de reducción de patógenos de la Clase A y que contienen bajos niveles de metales y no atraen a los vectores (moscas, mosquitos, roedores, aves, etc.) que pueden transmitir enfermedades (EPA/832-F-00-064, 2000).

- ❖ **Lodos Clase B:** aquellos aptos para su aplicación benéfica al suelo, con restricciones sanitarias de aplicación según tipo y localización de los suelos (coliformes fecales < 2.000.000 NMP/g de lodo). La EPA utiliza el término “Pollutant Concentration Biosolids” (PC) a aquellos biosólidos que también logran bajos límites de concentración de contaminantes que los EQ, pero incrementa la atracción a vectores (moscas, mosquitos, roedores, aves, etc.) que pueden transmitir enfermedades (EPA/832-F-00-064, 2000).

4.1.2 CARÁCTERÍSTICAS DE LOS LODOS RESIDUALES

Las características de los lodos residuales dependen de la composición inicial de las aguas residuales y de la secuencia de los procesos usados en el tratamiento. Diferentes procesos de tratamiento generan diferentes tipos y cantidades de lodos (EPA/625/ 10-84-003, 1984).

En una planta de tratamiento, las características de los lodos producidos pueden variar anualmente, estacionalmente o incluso diariamente, debido a las variaciones en la composición de las aguas residuales entrantes y variaciones en los procesos de tratamiento (EPA/625/10-84-003, 1984).

a. Componentes físico-químicos de lodos residuales

Los componentes más importantes en los lodos residuales, que pueden afectar en la selección para la disposición final son: la materia orgánica, los nutrientes, y los metales y compuestos tóxicos.

❖ Materia orgánica

Los lodos presentan una elevada concentración de materia orgánica, pudiendo alcanzarla hasta un 80% sobre la materia seca en caso de que se trate de lodos obtenidos por vía biológica, o hasta un 36% si se trata de lodos obtenidos por digestión avanzada, por tratamiento térmico o por tratamiento físico-químico (Seoánez, 2000).

Los principales beneficios de la materia orgánica en el suelo son (Sepúlveda et al., 2010):

- Contribuye a que las partículas minerales individuales del suelo formen agregados estables, mejorando así la estructura del suelo y facilitando su laboreo.
- Favorece una buena porosidad, mejorando así la aireación y la penetración del agua.
- Aumenta la capacidad de almacenamiento de agua del suelo.
- Por las razones anteriores, disminuye los riesgos de erosión.
- Proporciona partículas de tamaño coloidal con carga negativa (humus), que tiene alta capacidad de retener e intercambiar cationes nutritivos.
- Actúa como agente amortiguador al disminuir la tendencia a un cambio brusco del pH del suelo cuando se aplican sustancias de reacción ácida o alcalina.
- Participa en la formación de complejos orgánicos metálicos, estabilizando así micronutrientes del suelo que de otro modo no serían aprovechables.

El uso de lodos sólidos como fuente de materia orgánica, mejora la estructura del suelo y aporta macro y microelementos aprovechables por las plantas. Nuestra agricultura contribuye a la valorización de los lodos, pero para evitar efectos adversos hay que utilizarlos de acuerdo a la legislación vigente.

❖ Nutrientes

Los lodos contienen elementos químicos en forma mineral y orgánica. Entre estos, el nitrógeno (N), fósforo (P) y carbono orgánico (C) son los más importantes en proporcionar crecimiento a la planta y adecuadas condiciones físicas al suelo. El potasio (K) es también esencial para el crecimiento de las plantas (Linden et al., 1995). La composición química de los lodos residuales es muy variada, encontrándose concentraciones de 0.1% a 17.6%, 0.1 a 14.3% y 0.02% a 2.6% para N, P y K, respectivamente (Sabey, 1980, citado por Lima et al., 1995). Sin embargo, sólo una pequeña porción de estos nutrientes en forma inorgánica puede ser asimilada por las plantas.

Nitrógeno

La principal forma inorgánica del N en los lodos es la amoniacal ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), que representa más del 30% del N total contenido en la digestión anaeróbica de los lodos. Una pequeña cantidad del N se encuentra en forma nítrica ($\text{NO}_3^-\text{-N}$). En el suelo, el NH_4^+ de carga positiva es retenido por los coloides del suelo (capacidad de intercambio catiónico), sin embargo no ocurre lo mismo con NO_3^- de carga negativa. Ambos, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ y $\text{NO}_3^-\text{-N}$ son tomados y utilizados por las plantas (Linden et al., 1995).

El alto contenido de NO_3^- en el agua es tóxico para los humanos y el ganado, por esta razón, los lodos deben aplicarse en cantidades que no excedan las necesidades de nitrógeno a los cultivos (Linden et al., 1995).

Fósforo

La mayor cantidad de fósforo en los lodos (70 a 90%) se encuentra en forma inorgánica. El fósforo es también un nutriente esencial y está implicado en las reacciones bioquímicas en el suelo. Cuando los lodos residuales son aplicados al suelo, la adsorción química y los procesos de precipitación disminuyen el fósforo disuelto en la solución suelo a niveles muy bajos (Linden et al., 1995).

Cuando los lodos residuales son aplicados a rangos suficientes para satisfacer los requerimientos de N de los cultivos, la cantidad de P agregado con frecuencia excede tales requerimientos. Ya que el P es relativamente insoluble e inmóvil en el suelo, cuando se añade como fertilizante, tiende a acumularse en la superficie del suelo (Linden et al., 1995).

Los lodos aparentemente aportan al suelo cantidades importantes de macro y micronutrientes, sin superar los límites de toxicidad (Elliot y Singer, 1987).

❖ Metales pesados

Los metales pesados tienen acción dinámica y consecuencias ambientales muy diferentes unos de otros. Estos son: cobre, zinc, mercurio, cadmio, cromo, níquel y plomo. Representan un grupo de contaminantes que no son biodegradados biológicamente o químicamente de forma natural, principalmente en ambientes terrestres y en sedimentos acuáticos. Al contrario, son acumulados y pueden volverse aún más nocivos cuando reaccionan con algunos de los componentes de los suelos y sedimentos (PROSAB, 1999, citado por Falcón, 1995).

Cadmio

El cadmio es un metal pesado que se ha asociado a graves problemas de salud humana. La existencia en suelos agrícolas de niveles crecientes del metal genera gran preocupación ambiental debido a su movilidad y a la facilidad con que es absorbido por las plantas. La concentración promedio de cadmio en las plantas es 0.05-0.02 ppm; siendo excesivamente tóxico en un rango de 5-30 ppm. El contenido de cadmio en el suelo usualmente es menor de 1 ppm, pudiendo ser aportado al suelo por fungicidas, baterías, pigmentos, plásticos y aceite de motor. Los lodos residuales y algunos fertilizantes fosfatados también son una importante fuente de cadmio al suelo (EPA/600/4-91/029, 1992).

A valores altos de pH (mayores de 7.5), el cadmio es poco móvil en el suelo. En suelos ácidos (pH 4.5 a 5.5), el contenido de materia orgánica y los sesquióxidos pueden en gran parte controlar su movilidad (EPA/600/4-91/029, 1992).

La norma 503 establece las concentraciones máximas de metales que no pueden sobrepasarse en los biosólidos que van a ser aplicados al suelo. Éstas se denominan Concentraciones Límite (Ceiling Concentrations). También establece las tasas acumulativas de carga contaminante aplicables a ocho metales, las cuales no deben excederse en los lugares de aplicación. Además también menciona a las Concentraciones de Agentes Contaminantes, que si no son sobrepasadas en los biosólidos a ser aplicados, no requieren del seguimiento de las tasas acumulativas de carga contaminante.

Tabla 1: Concentración máxima de metales establecidos por la EPA en la norma 40 CFR 503 para biosólidos que serán dispuestos en suelos.

Metal	Concentración límite (mg/kg)	Concentración del contaminante (mg/kg)	Tasas acumulativas de carga contaminante (mg/ha)
Arsénico	75	41	41
Cadmio	85	39	39
Cobre	4300	1500	1500
Cromo *	3000	1200	3000
Plomo	840	300	300
Mercurio	57	17	17
Molibdeno	75	NL	NL
Níquel	420	420	420
Selenio	100	36	100
Zinc	7500	2800	2800

NL: no tiene límite establecido

* Eliminado por la EPA, con base en evaluaciones de toxicidad y acumulación en suelos

Fuente: U.S. EPA 1993 y 1994

❖ Características microbiológicas

Los lodos residuales contienen numerosos gérmenes patógenos que afectan al hombre, a los animales y a la vegetación. Los más conocidos son: las

salmonellas, los huevos de tenia, los estreptococos, los coliformes o ciertos virus, como los de la hepatitis (Seoánez, 2000).

La población de microorganismos patógenos guarda relación con factores como las condiciones socio-económicas, sanitarias de la población, la presencia de animales y el tipo de tratamiento al que el lodo fue sometido (Andreoli et al., 1999, citado por Torres et al., 2009).

En países como México, Brasil, Chile y Argentina se ha logrado regular el uso y disposición de biosólidos con características similares a la norma de los Estados Unidos de Norteamérica. La Tabla 2 resume la clasificación de los biosólidos en términos de la calidad microbiológica (Torres et al., 2009).

Coliformes totales

Los organismos coliformes totales se definen como bacterias gram-negativas aerobias o anaerobias facultativas, no esporuladas; que fermentan la lactosa a una temperatura de $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, con producción de ácido, gas y aldehído dentro de 24 a 48 horas (OPS, 1988). Este grupo está conformado por 4 géneros principalmente: *Enterobacter*, *Escherichia*, *Citrobacter* y *Klebsiella*.

Coliformes fecales

Los coliformes fecales son un subgrupo de las bacterias coliformes totales y tienen las mismas propiedades, excepto que toleran y crecen a una mayor temperatura 44.5°C . La especie predominante es *Escherichia coli*, que es exclusivamente de origen fecal (OPS, 1988).

E. coli es una bacteria encontrada en las materias fecales del hombre y de muchas especies animales. Su nicho ecológico natural es el intestino delgado y grueso, forma parte de la flora nativa intestinal y se encuentra en calidad de saprobio sin causar daño (Romero, 2007).

Tabla 2: Criterios microbiológicos para la caracterización de lodos residuales.

Criterio	EE.UU. (1)	México (2)	Brasil (3)	Chile (4)	Argentina (5)	Colombia (6)
Coliformes fecales (NMP/g)	Clase A: < 1x10 ³ Clase B: <2x10 ⁶	Clase A: <1x10 ³ Clase B: <1x10 ³ Clase C: <2x10 ⁶	Clase A: < 1x10 ³ Clase B: <1x10 ⁶	Clase A: <1x10 ³	Clase A: < 1x10 ^{3*} Clase B: <2x10 ^{6*}	Clase A: < 1x10 ³ Clase B: < 2x10 ⁶
<i>Salmonella</i> sp (NMP/g)	Clase A: < 3/4	Clase A: < 3 Clase B: < 3 Clase C: < 300	Ausencia en 10 g	Clase A: < 3/4	Clase A: < 3/4	Clase A: ausente Clase B: <1x10 ³
Huevos de helmintos (unid/g)	Clase A: < 1/4	Clase A: < 1 Clase B: < 10 Clase C: < 35	Clase A: <1/4 Clase B: < 10	Clase A: < 1/4	-----	Clase A: < 1/4
Virus (UFP/g)	Clase A: < 1/4	-----	Clase A: <1/4	-----	-----	-----

(1) Norma 40 CFR parte 503 (EPA, 2003) (2) NOM-004-2002 (SERMANAT, 2002) (3) Resolución N°375 de 29 de agosto de 2006 (CONAMA, 2006) (4) Decreto Supremo N°123 (30/08/2006) (CONAMA, 2000; Mena, 2008) (5) Resolución N°97/01 (22/11/2001) (Mena, 2008) (6) Propuesta de norma, versión de abril, 2009 (Minambiente, 2009), * Valores para *E. coli*.

4.1.3 APLICABILIDAD

Existen diversos métodos para aplicar los lodos residuales al suelo. La selección del método depende del tipo de terreno y de la consistencia de los lodos. Éstos se pueden inyectar al suelo, o pueden ser aplicados a la superficie del terreno (EPA/625/10-84-003, 1984).

A menudo resulta económico reducir el volumen de los lodos previamente a su transporte o almacenamiento. La cantidad de agua contenida en los biosólidos se puede reducir mediante procesos mecánicos, tales como el drenado, la deshidratación por prensa o la centrifugación, resultando en un material compuesto hasta en 30 por ciento de sólidos secos. Este material tiene la consistencia del suelo húmedo. Los biosólidos deshidratados no requieren de ningún tipo de equipo especializado y se pueden aplicar con la ayuda de equipos como esparcidores de estiércol operados con tractores (EPA/625/10-84-003, 1984).

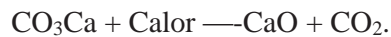
En la Norma 503 de la EPA, Estándares para la Aplicación y Disposición de Lodos de Aguas Residuales (*40 CFR Part 503 Rule: Standard for Use and Disposal of Sewage Sludge*), se requiere que los sólidos de las aguas residuales sean procesados antes de ser aplicados o incorporados al terreno. Este proceso, denominado “estabilización”, ayuda a minimizar la generación de olores, a destruir los agentes patógenos (organismos causantes de diversas enfermedades), y a reducir la atracción de vectores (EPA/625/10-84-003, 1984). Existen diversos métodos para la estabilización de los sólidos de las aguas residuales, incluyendo:

❖ Estabilización química.

Consiste en el uso de compuestos como la cal y el cloro. La cal es el producto de la calcinación de rocas calizas a temperaturas entre 880°C y 900°C, constituido principalmente por óxido de calcio (CaO) y otros componentes (Manrique et al., 2009).

La cal se adiciona para aumentar el pH hasta 12 o más con un tiempo de contacto adecuado para inactivar o destruir patógenos. Existen dos formas de estabilización química: la preestabilización y la postestabilización. En la primera, la cal es adicionada antes del desaguado, utilizándola como acondicionador acompañada de sales de aluminio y hierro. En la postestabilización en cambio, la cal se añade a la pasta obtenida después del proceso de desaguado.

Se usa principalmente cal viva para aprovechar el calor generado en la reacción de hidratación e incrementar la destrucción de patógenos. La cal viva se produce de la transformación química del carbonato de calcio (piedra caliza – CaCO_3) en óxido de calcio (Manrique et al., 2009).



La dosis de cal se obtiene mediante la experimentación, ya que existen muchos factores que la modifican, como es el caso del contenido de sólidos (Jiménez, 2001).

❖ La digestión

El método de digestión puede ser anaerobio y aerobio:

Digestión anaerobia. Se usa para los lodos del sedimentador primario que contienen elevadas concentraciones de materia orgánica, ya que de tratarse en condiciones aerobias induciría un rápido crecimiento de la biomasa y elevado consumo de oxígeno. La función es convertir los lodos en productos finales tales como líquidos, gases (65% a 70% como metano y de 25% a 30% como CO_2) y tener la menor producción posible de biomasa (Jiménez, 2001).

Digestión aerobia. Los digestores aerobios son aplicables a los lodos biológicos. Es una continuación del proceso de aeración tomando los subproductos del sedimentador secundario y del espesamiento. Los lodos procesados por la digestión aerobia están mineralizados por la respiración endógena y por el metabolismo del protoplasma. Son relativamente inertes pero tienen alto contenido de agua. La

reducción del contenido de humedad se logra por centrifugado, filtración al vacío, secado por aire o secado en lechos de lodos (Jiménez, 2001).

❖ Deshidratación

Después de estabilizarse los lodos, tanto en el proceso biológico del tratamiento de las aguas residuales, es necesario deshidratar los lodos a concentraciones de 20 al 30% de sólidos totales, para su disposición final como residuo sólido. La deshidratación se puede realizar de diferentes maneras (Orozco, 2005):

Lechos de secado. Son muy comunes para poblaciones hasta de 20000 habitantes, y consisten en un lecho de arena que recibe los lodos estabilizados y, por filtración y evaporación, se produce la deshidratación.

Filtros prensa. En este proceso la deshidratación se obtiene al forzar fuera el agua de los lodos bajo condiciones de alta presión. Es un sistema simple, pero requiere de mano de obra intensa.

Filtros de banda (*belt press*). Son deshidratadores continuos, que utilizan principios de acondicionamiento químico, drenaje y presión aplicada por bandas. Son efectivos pero consumen grandes cantidades de agua limpia.

Centrífugas. Son adecuadas para la deshidratación, aunque requiere de un buen mantenimiento, pues el mínimo desbalance en su estructura puede producir daños graves al equipo.

❖ Compostaje

Es la producción de compost a partir de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Los lodos se someten primero a un proceso de desecación y/o mezcla con materiales leñosos o fibrosos para someterlos al proceso controlado de transformación biológica aerobia y termófila. El compostaje se utiliza

como fertilizante que de acuerdo a la calidad servirá como abono en parques, forestación y agricultura (Lockhart et al., 2009).

4.1.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE LODOS

La aplicación de lodos residuales al suelo ofrece diversas ventajas, así como desventajas que deben ser consideradas antes de seleccionar esta opción de manejo.

❖ Ventajas

La aplicación al suelo es una forma excelente de reciclar los sólidos contenidos en las aguas residuales siempre y cuando se controle la calidad del material. Es también una opción relativamente económica, ya que la inversión de capital es generalmente menor comparada con otros métodos de manejo de los lodos residuales.

Los nutrientes contenidos en los lodos residuales, ofrecen diversas ventajas en comparación con los fertilizantes inorgánicos, debido a que se encuentran en forma orgánica y pueden ser liberados lentamente. Estas formas orgánicas de nutrientes son menos solubles en agua y, por lo tanto, tienen una menor probabilidad de lixivarse y contaminar fuentes de agua subterránea o ser arrastradas hasta aguas superficiales (EPA/832-F-00-064, 2000).

❖ Desventajas

La aplicación al suelo está limitada a ciertas épocas del año, especialmente en los climas más fríos. Los lodos residuales no deben ser aplicados en terrenos congelados o cubiertos de nieve, y a veces los campos de cultivo no son accesibles durante la estación de crecimiento. Por lo tanto, es necesario proporcionar una capacidad de almacenamiento junto con programas de aplicación al suelo (EPA/832-F-00-064, 2000).

El estado del tiempo puede interferir con la aplicación. Las lluvias pueden hacer imposible que el equipo de aplicación llegue a los campos agrícolas, haciendo necesario el almacenaje de los lodos.

Otra desventaja de la aplicación al terreno es la posible oposición pública, por la emisión de malos olores, principalmente cuando el sitio de uso se ubica cerca de áreas residenciales.

4.1.5 IMPACTOS AMBIENTALES

A pesar de tener efectos positivos en el ambiente, el uso agrícola de los lodos puede tener impactos negativos en el agua, el suelo y el aire, si no se realiza la aplicación correctamente.

Los impactos negativos en el agua resultan por la aplicación de los lodos residuales, utilizando tasas que exceden los requerimientos nutritivos de la vegetación. El exceso de nutrientes (principalmente compuestos de nitrógeno) pueden lixiviarse del suelo y llegar al agua subterránea. La escorrentía pluvial puede también transportar un exceso de nutrientes al agua superficial. Sin embargo, debido a la lenta liberación de los nutrientes en los biosólidos, la probabilidad de que los compuestos de nitrógeno sean lixiviados, es menor a cuando se emplean fertilizantes químicos. En las áreas fertilizadas por medio de biosólidos o de productos químicos, estos impactos son mitigados mediante prácticas de manejo apropiadas, las cuales incluyen la aplicación de biosólidos utilizando tasas agronómicas (tasas a las cuales los nutrientes son utilizados por la vegetación). El mantenimiento de la zona de separación entre las áreas de aplicación y los cuerpos de agua superficiales, y las prácticas de conservación del suelo minimizan los impactos en el agua superficial (EPA/832-F-00-064, 2000).

Las normas contienen estándares relacionados con los metales pesados y la aplicación de lodos residuales al terreno, y de cumplirse con dichos estándares se evita la acumulación de metales a niveles dañinos.

Los olores producidos por la aplicación de biosólidos, representan el principal impacto negativo al aire. La mayoría de los olores asociados con la aplicación al terreno son una molestia más que una amenaza a la salud humana o al ambiente. Los procesos de estabilización, tales como la digestión en reactores anaerobios que pueden disminuir la generación de olores. Los biosólidos que han sido desinfectados

a través de la adición de cal pueden emitir amoníaco, pero esto generalmente sucede en un área restringida y los olores se disipan de una manera rápida. La estabilización de biosólidos reduce los olores y da lugar a una operación que es menos desagradable que la aplicación de estiércol (EPA/ 832-F-00-064, 2000).

4.1.6 CRITERIOS DE DISEÑO

Los criterios de diseño de los programas de aplicación al terreno cubren los temas relacionados con las tasas de aplicación y lo adecuado del terreno.

Los biosólidos, el tipo de terreno y las características vegetativas son los factores de diseño más importantes a considerar.

❖ Biosólidos

Los biosólidos deben satisfacer los requisitos normativos referentes a la estabilización y el contenido de metales. Además, el contenido de nutrientes y las características físicas, tales como el porcentaje de sólidos, son utilizados para determinar las tasas adecuadas de aplicación para la cosecha que va a ser cultivada y el suelo en el cual será cultivada (EPA/832-F-00-064, 2000).

❖ Tipo de terreno

El tipo de terreno adecuado es determinado en base a las características del suelo, la pendiente, la profundidad del agua subterránea, y la proximidad al agua superficial.

El terreno debe ser suficiente para proporcionar áreas sin aplicación alrededor de los cuerpos de agua superficial, de pozos, y de humedales.

La profundidad mínima debe ser un metro de la superficie del terreno al agua subterránea.

El pH del suelo debe estar en el rango de 5.5 a 7.5 para reducir al mínimo el lixiviado de metales y para favorecer al máximo las condiciones de crecimiento de las cosechas (EPA/832-F-00-064, 2000).

❖ Tipo de vegetación

La vegetación, así como las características del terreno, generalmente no excluyen la aplicación de biosólidos puesto que la mayoría de la vegetación se beneficia en la práctica. Sin embargo, el tipo de vegetación afecta las opciones del equipo de aplicación, la cantidad de biosólidos que se aplican, y el periodo de aplicación (EPA/832-F-00-064, 2000).

La cantidad de lodos residuales que podrían ser aplicados a un terreno, está en función a la cantidad de nutrientes requerida por la vegetación y de la cantidad de metales encontrados en los lodos.

La Tabla 3 resume la frecuencia de aplicación, los periodos de aplicación, y las tasas de aplicación para diversos tipos de áreas.

Otro factor que se debe considerar en el diseño de un programa de aplicación al terreno es el periodo de aplicación. Períodos largos durante los cuales los terrenos están saturados o congelados limitan las oportunidades de aplicación. Por eso, se debe disponer de un lugar de almacenamiento o una opción alternativa cuando no se pueda realizar la aplicación.

Tabla 3: Escenarios típicos de aplicación de biosólidos.

Tipo de área/ vegetación	Periodo	Frecuencia de aplicación	Tasa de aplicación
<i>Terreno agrícola</i>			
Maíz	abril, mayo, luego de la cosecha	Anualmente	12 a 24 T secas/ha
Granos pequeños	marzo a junio, agosto y en otoño	Hasta 3 veces por año	4.8 a 12 T secas/ha
Semilla de soya	abril a junio y en otoño	Anualmente	12 a 48 T secas/ha
Heno	después de cada poda	Hasta 3 veces por año	4.8 a 12 T secas/ha
<i>Área de bosques</i>	Todo el año	Una vez cada 2 a 5 años	12 a 240 T secas/ha
<i>Terreno pastoreo</i>	Todo el año	Una vez cada 1 a 2 años	4.8 a 144 T secas/ha
<i>Áreas de recuperación</i>	Todo el año	Una vez	144 a 240 T secas/ha

Fuente: U.S. EPA, 1994

4.2 MARCO LEGAL

En el Perú, no existe una norma específica que regule la utilización de lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales para fines agrícolas.

En Estados Unidos, la EPA ha establecido normas que regulen el uso de este residuo, según sus características contaminantes. La norma norteamericana está fundamentada en estudios basados en análisis de riesgo de contaminación ambiental y de salud humana para aquel país.

Para el caso de los metales pesados, los límites establecidos por la EPA pueden servir como referencia debido a la falta de información local, sin embargo las condiciones ambientales específicas del país deben ser consideradas (Falcón, 2005).

En cuanto a la característica microbiológica, la legislación de la EPA que regula el uso de los lodos en la agricultura establece límites para garantizar la seguridad del agricultor, del consumidor de los productos agrícolas y del medio ambiente. Esta legislación limita la presencia de algunos patógenos indicadores de la calidad de los

lodos. Estos indicadores son los coliformes fecales y los huevos de helmintos. Estando controlados estos organismos, los demás agentes patógenos presentes en los lodos, también estarán en niveles compatibles con el uso en la agricultura. Aun cuando presente un perfil sanitario aprobado por la norma, los lodos no pueden ser aplicados indiscriminadamente (Falcón, 2005).

La legislación de la EPA especifica criterios para la clasificación de los lodos, de acuerdo con las características sanitarias y uso agrícola del material.

V. MATERIALES Y METODOS

5.1 MATERIALES

5.1.1 UBICACIÓN

El ensayo se realizó durante la época de Primavera-Verano, entre los meses de septiembre de 2012 a enero de 2013 en el pueblo de Mirahuay, ubicado en la provincia de Oyón, Departamento de Lima. Sus coordenadas son 10°52'44.41" S y 76°58'30.74" O, a una altitud de 1750 m.s.n.m.

5.1.2 CONDICIONES CLIMÁTICAS

El clima del pueblo de Mirahuay es cálido y muy árido. La precipitación es muy baja entre mayo y septiembre y siendo de mayor nivel durante los meses de enero a marzo. La temperatura máxima es de 30°C y la mínima es de 13°C.

5.1.3 DETERMINACIÓN DE LOS LODOS RESIDUALES

Se extrajo 7.5 kg aproximadamente de lodos residuales de la planta de tratamiento de efluentes domésticos por aireación extendida (lodos activados), la cual se encuentra ubicada en la sede del Club Regatas Lima, en el km 20.4 de la Panamericana Sur.

Las muestras de lodos residuales fueron enviadas al laboratorio de Análisis de Suelos Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina (LASPAF-UNALM) para el análisis de materia orgánica. El informe de análisis se presenta en el Anexo N°1. Asimismo, fueron enviadas al laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología “Marino Tabusso” para los respectivos análisis microbiológicos. El informe de ensayo se presenta en el Anexo N°2 para cada proporción de lodos analizados.



Figura 1: Lodos residuales de la planta de tratamiento de efluentes domésticos por aireación extendida (lodos activados).



Figura 2: Lodos residuales después de haber pasado por el proceso de trituración.

5.1.4 DETERMINACIÓN DEL SUELO

Se extrajo 7.5 kg aproximadamente de suelo de la Universidad Agraria La Molina para el respectivo ensayo.

Se realizó el análisis de caracterización de la muestra de suelo en el laboratorio de Análisis de Suelos Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina (LASPAF-UNALM). El análisis de caracterización del suelo, se presenta en el Anexo N°3.

5.1.4.1 CONTENIDO DE METALES TOTALES - SUELO

Se realizó el análisis de concentración de cadmio y plomo en la muestra de suelo en el laboratorio de Análisis de Suelos Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina (LASPAF-UNALM).

5.1.5 CULTIVOS INDICADORES

Para el experimento de invernadero se utilizaron los siguientes cultivos indicadores:

- Maíz (*Zea mays* L.) híbrido PM-213.
- Frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) var. blanco molinero.
- Lechuga (*Lactuca sativa* L.) cv. White Boston también conocida como lechuga de seda.
- Rábano (*Raphanus sativus* L.) cv. Crimson Giant.

5.1.6 OTROS MATERIALES

Para la ejecución de los trabajos de campo se utilizaron los siguientes materiales:

- Bolsas de papel
- Envases plásticos
- Guantes quirúrgicos
- Espátula
- Etiquetas

De Gabinete

- Útiles de escritorio
- Computadora portátil
- Impresora y escáner
- Cámara fotográfica

5.2 METODOS

5.2.1 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LOS LODOS RESIDUALES

Lodos Residuales

Los lodos residuales fueron obtenidos de la planta de tratamiento de efluentes domésticos por aireación extendida (lodos activados) de la sede del Club Regatas Lima, ubicada en el km 20.4 de la Panamericana Sur.

Está diseñada para tratar 80 m³/día de agua residual domestica proveniente del uso de los servicios higiénicos y cocina de sus instalaciones.

Está compuesta por una cámara anaerobia, dos cámaras de aireación, dos conos de sedimentación y una cámara de secado de lodos. Los ciclos de aireación son: 45 minutos de aireación y 15 de descanso.

Los lodos provenientes del sedimentador secundario fueron recirculados hacia la cámara de aireación, el exceso de lodos fueron purgados del sistema, de acuerdo a la cantidad de sólidos sedimentables presentes en el reactor biológico.

El lecho de secado de lodos, es el depósito adyacente al área de la planta de tratamiento, el cual tiene la función de recibir los lodos excedentes para su deshidratación.

Toma de muestras

El objetivo de la toma de muestras es obtener muestras representativas para enviarlas al laboratorio y ser analizadas. Los materiales requeridos para el muestreo son bolsas de papel, guantes quirúrgicos y una espátula.

De acuerdo a la metodología de Caldera et al. (2007), se realizó la toma de muestras de la siguiente manera:

- i) Se tomaron muestras simples de 1 kg de peso, distribuidas uniformemente al azar de la parte superior, media e inferior del lecho de secado de lodos.

ii) Se colocaron las muestras en bolsas de plástico y luego se sellaron, para evitar la contaminación de la muestra con elementos extraños.

iii) Se llevaron las muestras al gabinete. Una vez ahí, se abrieron las bolsas y se mezclaron todas las muestras simples en una bandeja, para obtener una muestra compuesta que sea representativa del lecho de secado de lodos.

iv) Con la ayuda de un pilón se trituró y se tamizó la muestra compuesta, para obtener una muestra homogénea.

v) Se pesó 1 kg de la muestra compuesta homogénea, se colocó en una bolsa plástica nueva, se rotuló y luego se envió al laboratorio para los análisis respectivos.

Métodos de Análisis Físicoquímico

Siguiendo los métodos empleados en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía en la Universidad Nacional Agraria La Molina (LASPAF-UNALM), se determinarán los parámetros siguientes:

i) Densidad aparente: se refiere al peso por unidad del volumen del suelo seco en el horno. El método del cilindro se realizó para determinar la densidad aparente, el cual se utilizó cilindros para conocer el volumen, luego las muestras de suelo fueron llevadas al horno a 105°C, luego de 24 horas, se extrajeron las muestras secas y se procedió a pesarlas (Casanova, 2005).

ii) Humedad del suelo: es la cantidad de agua por volumen de tierra que hay en un terreno. Se determinó por el método gravimétrico, en el cual se obtuvieron muestras representativas de suelo y se colocaron en recipientes adecuados, previamente pesados y fueron secadas en la estufa a una temperatura de 105°C. El periodo de secamiento se prolongó hasta que las muestras tuvieran un peso constante, el cual tomó cerca de 24 horas. Luego se pesaron las muestras, y se calculó la diferencia entre el peso inicial y el peso seco, el cual representa el peso de agua de la muestra. El porcentaje de humedad de la muestra se obtiene dividiendo el peso de agua perdido por el peso de suelo seco multiplicado por 100 (Blair, 1957).

iii) pH: mediante el método de pasta saturada, se preparó pesando 20 gramos de lodos en un vaso 100 ml, se le adicionó 20 ml de agua destilada, se agitó durante 30 minutos, dejando reposar por 30 minutos para luego leer el pH en el potenciómetro sumergiendo el electrodo (Bazán, 1996, citado por Pajuelo, 2006).

iv) Conductividad eléctrica (CE): se midió empleando una relación suelo: agua de 1:1, utilizando el conductímetro (Bazán, 1996, citado por Pajuelo, 2006).

v) Materia orgánica:

Este parámetro se calculó a partir del carbono orgánico total.

Carbono total: se determinó mediante el método de Walkley y Black, el cual se basa en la oxidación de la materia orgánica con $K_2Cr_2O_7$ más H_2SO_4 . El exceso de $K_2Cr_2O_7$ es determinado por titulación con $FeSO_4$ (sal de Mohr). El punto de equivalencia en esta reacción es dada por el indicador redox difenilamina. La materia orgánica es estimada asumiendo que esta contiene 58% de carbono por el factor de Van Bemmelen (1.724) (Bazán, 1996, citado por Pajuelo, 2006).

vi) Nitrógeno total: fue determinado por el método de micro-Kjeldahl, en el cual se secó y se molió la muestra. Posteriormente, en un balón de destilación micro-Kjeldahl de 100 ml. se colocó 0.1 g de muestra, luego se adicionó H_2SO_4 y el catalizador a la muestra por lo que esta se calentó, convirtiendo al nitrógeno orgánico en $(NH_4)_2SO_4$. Luego se destiló con la adición de NaOH para dar el carácter salino a la solución, el NH_4 se transforma en NH_3 , mediante el sistema de destilación para enfriar el flujo gaseoso que da lugar al NH_4OH , el cual se recolectó en una solución de ácido bórico; se tituló con H_2SO_4 hasta que el indicador cambie de color. Los mililitros del ácido usado en esta titulación por la normalidad del ácido, equivalen a los miliequivalentes de nitrógeno en la muestra (Bazán, 1996, citado por Pajuelo, 2006).

a. Nutrientes

i) Fósforo: el método que se aplicó fue la digestión vía seca.

Se realizó la calcinación de la muestra en la mufla 450 – 500°C y se obtuvo un residuo, el cual se extrajo el fósforo de los lodos por digestión con una mezcla de ácidos nítrico y perclórico (1:1). Luego se tomó una alícuota de 1.0 ml de solución clorhídrica; se le agregó la solución sulfomolibdica, solución reductora (amino-naftol-sulfónico) y agua destilada para formar un complejo soluble de color azul. Posteriormente, se lee la transmitancia a la longitud de onda 650 nm y se compara con la curva patrón de fósforo a partir de estándar de 80 mg de P/L (Bazán, 1996, citado por Pajuelo, 2006).

ii) Los contenidos totales de potasio, calcio y magnesio, fueron determinados por espectrometría de absorción atómica.

Se extrajo el potasio de los lodos por digestión nitro-perclórica. Seguido se tomó una alícuota, se adicionó 9 ml de agua destilada y 10 ml de solución lantano 1% y se colocó en el equipo de espectrometría de absorción atómica.

Dentro del equipo, la muestra es conducida al quemador y es atomizada por una llama; al recibir una radiación electromagnética proveniente de una fuente externa, los átomos de potasio absorben dicha radiación; se mide la absorbancia de dicha radiación por los átomos y posteriormente se determina la concentración con el uso de una curva estándar (Bazán, 1996, citado por Pajuelo, 2006).

b. Metales pesados. Elementos traza (Pb y Cd)

Se determinó a través del método de Espectrofotometría de Absorción Atómica. Este método consistió en la medición de las especies atómicas por su absorción a una longitud de onda particular. La especie atómica se logró por atomización de la muestra, con llama, que nebuliza la muestra y luego la diseminó en forma de aerosol dentro de una llama de aire acetileno u óxido nitroso-acetileno (Morral, 1992).

5.2.2 BIOENSAYOS DE FITOTOXICIDAD

El ensayo de crecimiento del cultivo indicador, fue realizado en el pueblo de Mirahuay, ubicado en la provincia de Oyón, Departamento de Lima, empleando

envases plásticos de 1 kg de capacidad y aplicando los siguientes tratamientos, de acuerdo a la Tabla 4:

Tabla 4: Tratamientos correspondientes a mezclas de suelo y lodos residuales (%).

Tratamiento	Lodos (%)	Suelo (%)
T0	0	100
T1	25	75
T2	50	50
T3	75	25
T4	100	0

Cada tratamiento se hizo por triplicado, conteniendo cada recipiente aproximadamente 1 kg de suelo secado al aire, triturado, mezclado y homogenizado con la tasa de lodos usada en cada caso (Acosta et al., n.d.).

Los recipientes se incubaron a su capacidad de campo durante dos semanas, luego la siembra se realizó empleando primero, 5 semillas certificadas de maíz (*Zea mays* L.); segundo, 5 semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.); tercero, 10 semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y por último, 5 semillas de rábano (*Raphanus sativus* L.), por envase a una profundidad aproximada de 2.5 cm las semillas de maíz, frijol y rábano y 0.5 cm las semillas de lechuga. A los 10 días después de la siembra, las plántulas fueron entresacadas dejando solamente 2 plantas de maíz, 2 plantas de frijol, 4 plantas de lechuga y 2 plantas de rábano, por envase y se dejaron crecer por un periodo de 10 días.

Diariamente se le adicionó agua ionizada y clorada, para mantener la humedad del suelo, cercana a la capacidad de campo. Los resultados de ensayo del laboratorio del monitoreo de agua, se muestran en el Anexo N°04.

Al finalizar el ensayo, las plantas fueron cosechadas y se cortaron dejando las hojas, luego en bolsas de papel fueron secadas en la estufa a 65°C por 48 horas hasta peso constante y pesadas para determinar la producción de materia seca. Asimismo, se tomaron muestras compuestas para ser llevadas al laboratorio para la determinación del contenido de Cd (Acosta et al., n.d.).

Al final de las cuatro cosechas, se tomaron muestras compuestas de cada envase para luego ser llevadas al laboratorio para determinar la población de coliformes fecales y totales y comprobar si los patógenos se encuentran en el suelo.



Figura 3: Pesaje de muestras en el laboratorio a los 20 días de haber germinado las plantas.

5.2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos obtenidos de las variables evaluadas (peso fresco y seco), fueron sometidos al análisis de varianza (ANVA) sin transformación. Posteriormente, fueron comparados mediante la prueba de comparación de medias HSD de Tukey al 95% de confianza. El análisis confirma la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos. El objetivo es identificar qué tratamientos son estadísticamente diferentes y en cuánto oscila el valor de esas diferencias.

El análisis estadístico fue realizado empleando el paquete *Agricolae* del ambiente para computación estadística R, versión 2.15.1 (R Core Team, 2012).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 CARACTERÍSTICAS DEL LOS LODOS RESIDUALES

Los lodos residuales son sólidos, tienen una densidad de 0.72g/cm^3 y de color grisáceo.

De acuerdo a la Descripción de Perfiles de Suelos, la consistencia de los lodos, cuando se encuentran mojados no son adherentes ni plásticos. En consistencia húmeda, son extremadamente firmes. Asimismo, la consistencia en seco, son extremadamente duros (FAO, 1997).

Los lodos residuales, luego de ser enviados al laboratorio resultaron con las siguientes características químicas:

Tabla 5: Características químicas de los lodos residuales.

Parámetros	Lodos residuales PTAR	Interpretación
pH	6.19	Ligeramente ácido
C.E. (dS/m) (1:1)	26.90	Altamente salino
Humedad (% en peso fresco)	8.11	Normal
M.O. (% en peso seco)	41.51	Moderado
C (%)	24.08	Moderado
N (%)	3.99	Alto
P ₂ O ₅ (%)	4.52	Muy alto
K ₂ O (%)	0.47	Bajo
CaO (%)	6.51	Alto
MgO (%)	1.31	Alto
Na (%)	0.31	Bajo
Pb (ppm)	22.34	Bajo
Cd (ppm)	7.28	Moderado
Relación C/N	6.03	Muy bajo

Fuente: LASPAF-UNALM

Los resultados del laboratorio de los lodos residuales, obtenidos de la planta de tratamiento de efluentes domésticos por aireación extendida (lodos activados), indican que la concentración de Cd es de 7.28 mg/kg, el cual no excede a la concentración límite (85 mg/kg), establecido por la EPA (1992) en la norma 40 CFR 503 para biosólidos que serán dispuestos en el suelo. Asimismo, la concentración de Pb resultó de 22.34 mg/kg, el cual no excede a la concentración límite (840 mg/kg) establecido por la EPA (1992).

A continuación se presenta en la Tabla 6 el resultado del análisis microbiológico de los lodos residuales.

Tabla 6: Parámetros microbiológicos de los lodos residuales.

Parámetros	Lodos residuales PTAR	Interpretación
Coliformes totales (NMP/g)	90×10^4	-
Coliformes fecales (NMP/g)	40×10^2	Clase B (EPA)

Fuente: Laboratorio “Marino Tabusso”

De acuerdo a la cantidad de coliformes fecales que presenta el lodo residual (40×10^2 NMP/g), se clasifica como lodo tipo clase B (coliformes fecales $< 2.000.000$ NMP/g de lodo), según la Norma 503 de la EPA, Estándares para la Aplicación y Disposición de Lodos de Aguas Residuales (40 CFR Part 503 Rule: Standard for Use and Disposal of Sewage Sludge).

6.2 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

El suelo utilizado es de textura franco arenoso. Este suelo proviene de la Universidad Nacional Agraria La Molina, el cual sigue siendo cultivado.

En la Tabla 7 se presenta las características químicas, las cuales fueron analizadas aplicando la tabla de interpretación de los resultados del laboratorio (LASPAF), donde el suelo es considerado ligeramente alcalino y ligeramente salino. La concentración de materia orgánica es media. La capacidad de intercambio catiónico es 10.61 meq/100g.

Tabla 7: Características químicas del suelo.

Parámetros	Suelo	Interpretación
pH	7.30	Ligeramente alcalino
C.E. (dS/m) (1:1)	2.94	Ligeramente salino
CaCO ₃ (%)	4.80	Moderadamente calcáreo
M.O. (% en peso seco)	2.76	Medio
N (%)	0.138	”
C (%)	1.60	”
P (mg/kg)	28.5	Alto
K (”)	592	”
CIC (cmol _c /kg)	10.61	Bajo
Ca ⁺² (”)	7.85	Medio
Mg ⁺² (”)	1.72	”
K ⁺ (”)	0.87	Alto
Na ⁺ (”)	0.17	Bajo
Saturación de bases (%)	100	Alto
Pb (mg/kg)	53.03	Moderado
Cd (”)	1.75	Bajo
Relación C/N	11.59	Ligeramente alto

Fuente: Laboratorio de Suelos

El suelo presenta una relación óptima Ca/Mg de 4.6, sin embargo es deficiente en magnesio debido a que la relación K/Mg es de 0.5 (Carrasco et al., 2002). Asimismo, tiene alta concentración de fósforo y potasio disponible.

6.2.1 CONTENIDO DE METALES EN EL SUELO

La concentración de metales pesados en el suelo se compara con los valores reportados por la EPA (1992), donde se establecen niveles para un suelo superficial, catalogándolo como excesivamente fitotóxico (Tabla 8).

Tabla 8: Concentración de metales y no metales (elementos traza) considerado como sitios excesivamente fitotóxicos en suelo superficial y en plantas. Fuente: EPA, 1992.

Metal	Suelo Superficial (mg/kg)	Planta (mg/kg)
Cadmio (Cd)	3-10	5-30
Plomo (Pb)	50-100	30-300

Los resultados del suelo obtenido de la UNALM indican, que la concentración de Cd es de 1.75 mg/kg, el cual no se encuentra en el intervalo 3-10 mg/kg para un suelo superficial establecido por la EPA (1992). Asimismo, la concentración de Pb de 53.03 mg/kg, el cual se encuentra en el intervalo 50-100 mg/kg para un suelo superficial establecido por la EPA (1992), lo que evidencia un alto contenido de Pb.

Tabla 9: Concentraciones totales de Cadmio (Cd) y Plomo (Pb), utilizadas como niveles de referencia para la identificación de suelos contaminados en algunos países del mundo (Hernández, 2011).

PAÍS	Criterio	Cadmio mg/kg		Plomo mg/kg		FUENTE
		RSH	RE	RSH	RE	
Holanda		28	13	622	580	RIVM (2001)
Australia		20	3	300	300	DEP (2001)
Canadá		10	1.4	140	70	CEQG (2002)
EUA		37	20	400	500	US-EPA (2002)*; ORNL (1997)
México		20	20	200	100	PROFEPA (2000)

RSH: riesgo a la salud humana; RE: riesgo ecológico;*: En los Estados Unidos de Norte América (EUA), los niveles de referencia varían entre las diferentes regiones. En esta tabla se presentan los que corresponden a la región 9 (Arizona, California, Hawái e Islas del Pacífico). Fuente: EPA 1992.

En la Tabla 9, se muestra la concentración de Cd y Pb utilizada como nivel de referencia en algunos países para identificar los suelos contaminados por estos metales. Para ambos casos, se observa que los valores de Canadá son menos permisibles que los otros países. Sin embargo, se tomará en cuenta los valores de la EPA (1992). Los resultados del suelo obtenido de la UNALM indican, que la concentración de Cd y Pb dio como resultado un valor menor al establecido por la EPA, para riesgo ecológico y salud humana.

6.3 EFECTO DE LA APLICACIÓN DE LODOS SOBRE EL CRECIMIENTO

A continuación, en las Tablas (10, 11, 12 y 13) se presenta el análisis del efecto de la aplicación de lodos residuales de los diferentes tratamientos sobre el crecimiento de las plantas de maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), lechuga (*Lactuca sativa* L.) y rábano (*Raphanus sativus* L.).

6.3.1 CULTIVO MAÍZ (*Zea mays* L.)

a. Germinación, altura de la planta a los 10 y 20 días y producción de biomasa.

Tabla 10: Efecto de la proporción de lodos residuales sobre el número de plantas germinadas, la altura a los 10 y 20 días después de la siembra (dds) y la producción de biomasa de plantas de maíz (*Zea mays* L.).

Tratamiento	Proporción suelo:lodos	N° plantas germinadas	Altura de planta		Peso fresco	Peso seco
			10 dds	20 dds		
T ₀	100:0	3.7 a	1.0 b	17.2 b	4.7 b	3.2 b
T ₁	75:25	5.0 a	6.4 a	29.8 a	7.2 a	3.5 a
T ₂	50:50	4.7 a	6.6 a	31.4 a	7.2 a	3.5 a
T ₃	25:75	4.0 a	6.9 a	29.9 a	7.0 a	3.4 ab
T ₄	0:100	5.0 a	7.1 a	32.2 a	7.0 a	3.4 ab

Los valores son promedio de tres repeticiones. Medias de tratamientos dentro de una columna seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0.05$), de acuerdo a la prueba HSD de Tukey.

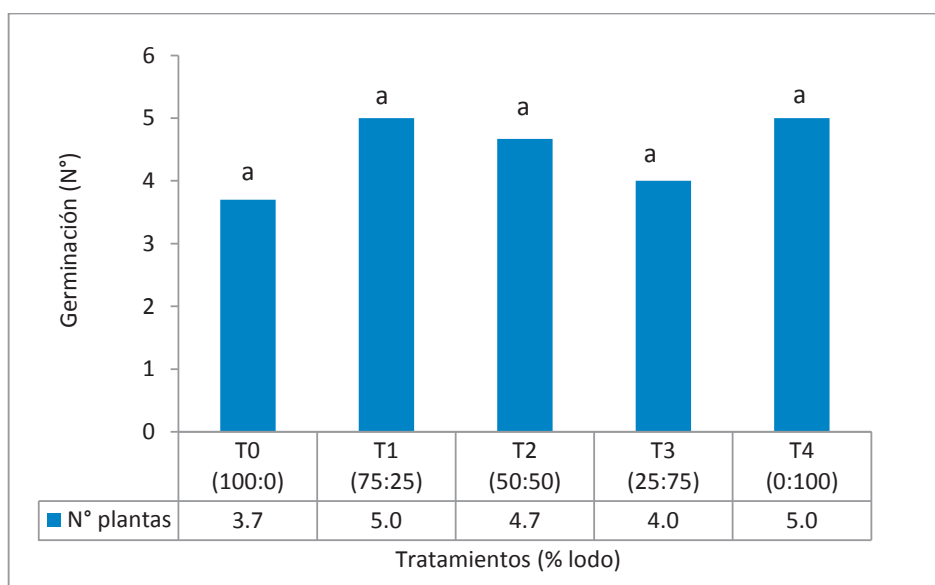


Figura 4: Germinación (N°) de semillas de maíz (*Zea mays* L.), sembradas en mezclas de lodos residuales y suelo.

La aplicación de lodos residuales en el sustrato incrementó la germinación de las semillas de maíz con respecto al registrado en el suelo testigo (Figura 4), el incremento no fue estadísticamente significativo. El bajo número de plantas

germinadas y la menor altura de plantas que presentó el suelo sin aplicación de lodos, se debió principalmente a su mayor densidad y compactación, que posiblemente limitó la adecuada oxigenación, hidratación y emergencia de las plántulas.

De acuerdo al estudio por Qasim et al. (2001), se pudo observar un efecto favorable con la aplicación de lodos residuales, utilizando los tratamientos (10, 20, 30 ton/ha), resultando estadísticamente no significativos. Resultados similares a los obtenidos de la Figura 4, a excepción de las mayores concentraciones 40 y 50 ton/ha, donde el estudio mencionado observó una disminución en el porcentaje de germinación, cuando se incrementó la cantidad de lodos.

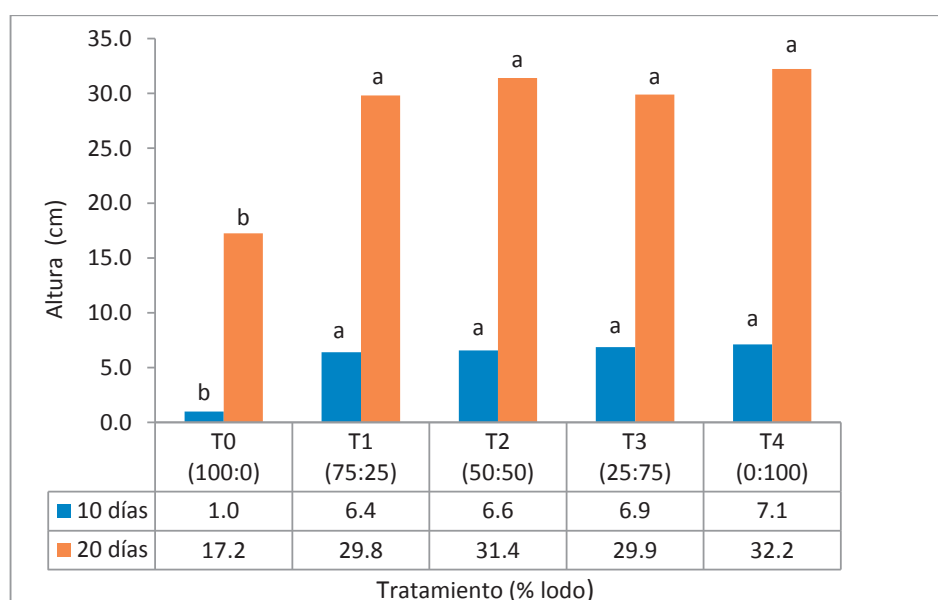


Figura 5: Altura del maíz (*Zea mays* L.) durante 10 y 20 días en las distintas mezclas de lodos residuales y suelo.

El uso de lodos residuales en todas las proporciones ensayadas, incrementó significativamente la altura de las plantas de maíz a los 10 y 20 días después de la siembra (Figura 5).

De acuerdo al estudio por Qasim et al. (2001), se pudo observar que los tratamientos de 10, 20 y 30 ton/ha fueron significativamente altos comparados con los otros tratamientos, pero estadísticamente no significativos entre estos.



Figura 6: Cultivo de maíz (*Zea mays* L.) utilizando el tratamiento T4 (0:100) a los 10 días.



Figura 7: Cultivo de maíz (*Zea mays* L.) utilizando el tratamiento T0 (100:0) a los 10 días.



Figura 8: Cultivo de maíz (*Zea mays* L.) a los 20 días.

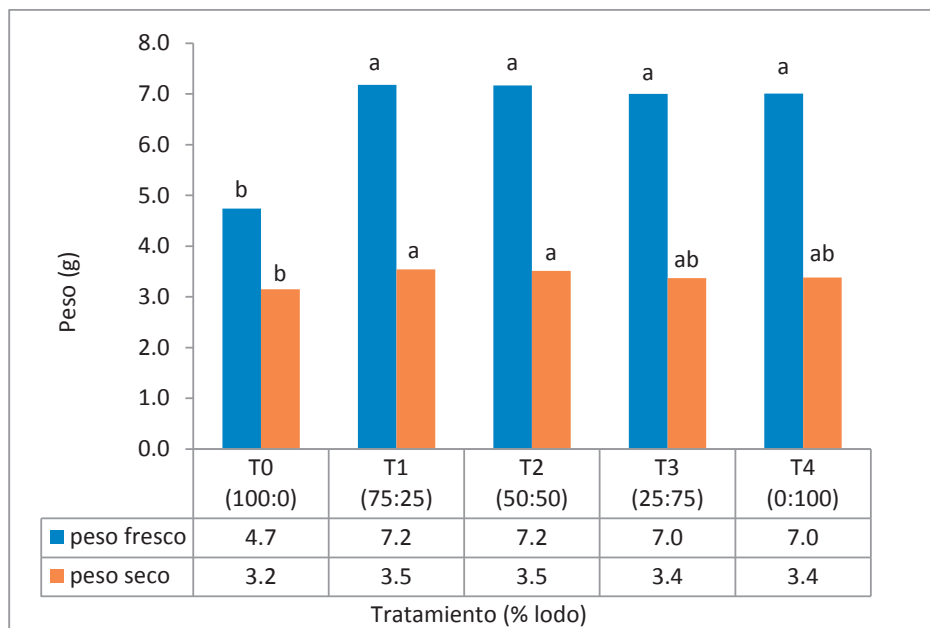


Figura 9: Biomasa de las plantas de maíz (*Zea mays* L.) durante su crecimiento en las distintas mezclas de lodos residuales y suelo.

La aplicación de lodos residuales en el sustrato incrementó la producción de biomasa con respecto al registrado en el suelo testigo (Figura 9), este incremento fue estadísticamente significativo.

6.3.2 CULTIVO FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.)

a. Germinación, altura de la planta a los 10 y 20 días y producción de biomasa.

Tabla 11: Efecto de la proporción de lodos residuales sobre el número de plantas germinadas, la altura a los 10 y 20 días después de la siembra (dds) y la producción de biomasa de plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.).

Tratamiento	Proporción suelo:lodos	N° plantas germinadas	Altura de planta		Peso fresco	Peso seco
			10 dds	20 dds		
T ₀	100:0	2.3 a	6.7 a	18.1 a	8.0 a	3.5 ab
T ₁	75:25	3.3 a	4.5 a	17.1 a	7.8 a	3.7 a
T ₂	50:50	3.3 a	10.4 a	17.2 a	7.6 a	3.6 ab
T ₃	25:75	4.0 a	10.1 a	18.0 a	8.0 a	3.5 ab
T ₄	0:100	3.0 a	3.2 a	8.9 a	4.7 a	3.3 b

Los valores son promedio de tres repeticiones. Medias de tratamientos dentro de una columna seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0.05$), de acuerdo a la prueba HSD de Tukey.

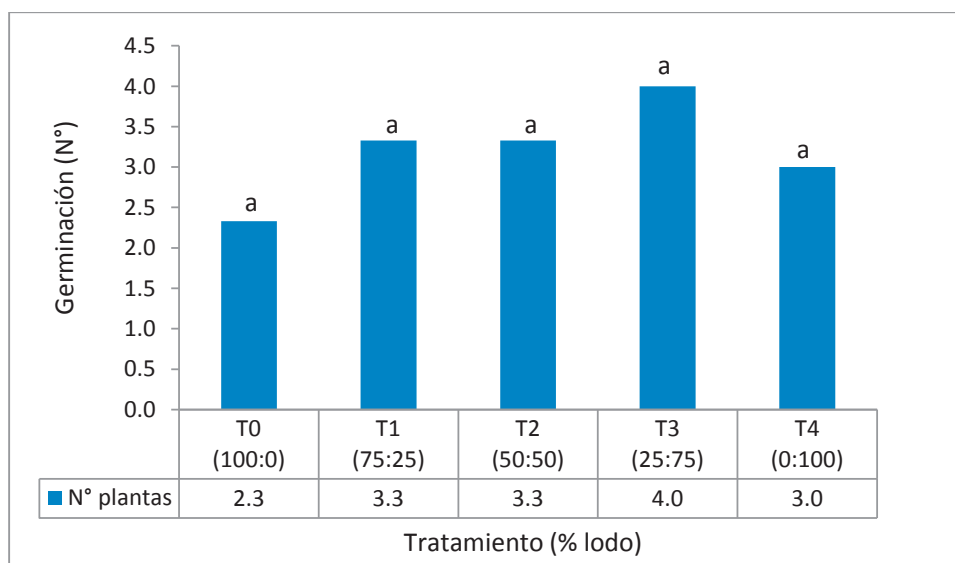


Figura 10: Germinación (N°) de semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), sembradas en mezclas de lodos residuales y suelo.

La aplicación de lodos residuales en el sustrato incrementó la germinación de las semillas de frijol con respecto al registrado en el suelo testigo (Figura 10), este incremento no fue estadísticamente significativo.

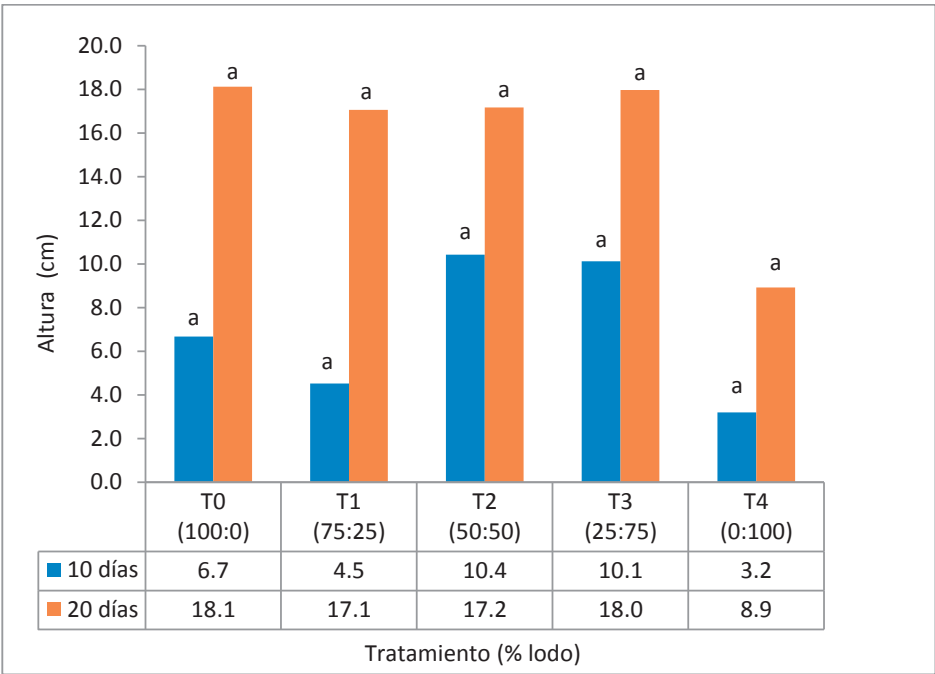


Figura 11: Altura del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) durante 10 y 20 días en las distintas mezclas de lodos residuales y suelo.

El uso de lodos residuales en los tratamientos T2 (50:50) y T3 (25:75), incrementó significativamente la altura de las plantas de frijol, a los 10 días después de la siembra respecto al suelo testigo, sin embargo a los 20 días sólo el tratamiento T4 (0:100), resultó con una altura menor a los demás tratamientos, siendo estos valores estadísticamente no son significativos (Figura 11).



Figura 12: Cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) utilizando el tratamiento T2 (50: 50) a los 10 días.



Figura 13: Cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) utilizando el tratamiento T4 (0:100) a los 10 días.

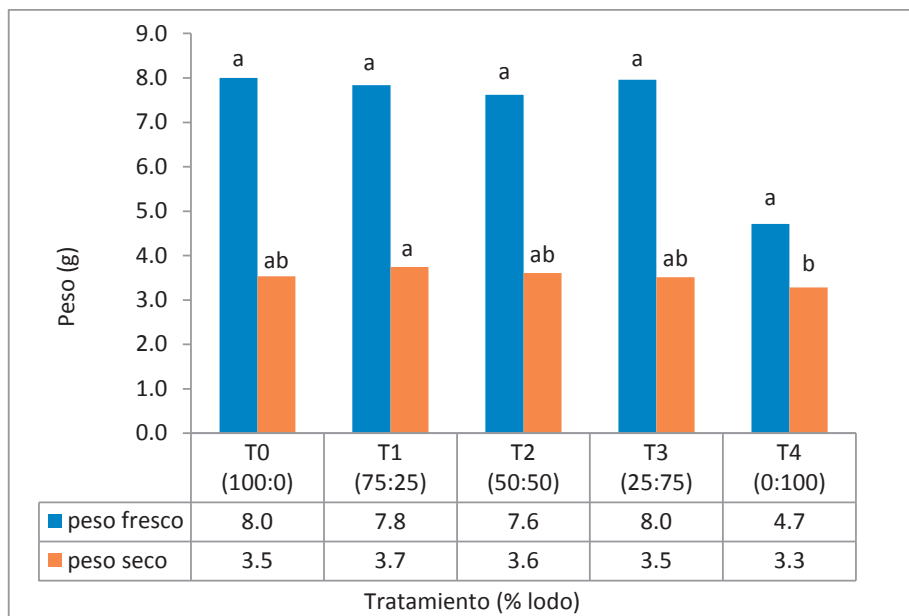


Figura 14: Biomasa de las plantas del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) durante su crecimiento en las distintas mezclas de lodo residual y suelo.

En la Figura 14, se observa que la aplicación de lodos residuales en el sustrato no incrementó la producción de biomasa con respecto al registrado en el suelo testigo, sin embargo existe diferencias significativas del T1 (75:25) respecto a T4 (0:100).

6.3.3 CULTIVO LECHUGA (*Lactuca sativa* L.)

a. Germinación, altura de la planta a los 10, 20 y 37 días y producción de biomasa.

Tabla 12: Efecto de la proporción de lodos residuales sobre el número de plantas germinadas, la altura a los 10, 20 y 37 días después de la siembra (dds) y la producción de biomasa de plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.).

Tratamiento	Proporción suelo:lodos	N° plantas germinadas	Altura de planta			Peso fresco	Peso seco
			10 dds	20 dds	37 dds		
T ₀	100:0	2.3 a	1.5 a	3.3 a	6.3 a	3.7 a	3.1 a
T ₁	75:25	1.3 a	0.6 a	2.4 a	5.2 a	3.7 a	3.2 a
T ₂	50:50	1.7 a	1.5 a	3.8 a	5.3 a	4.0 a	3.2 a
T ₃	25:75	2.0 a	1.4 a	4.2 a	4.8 a	2.6 a	2.1 a
T ₄	0:100	2.3 a	1.9 a	3.9 a	1.5 a	2.2 a	2.0 a

Los valores son promedio de tres repeticiones. Medias de tratamientos dentro de una columna seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0.05$), de acuerdo a la prueba HSD de Tukey.

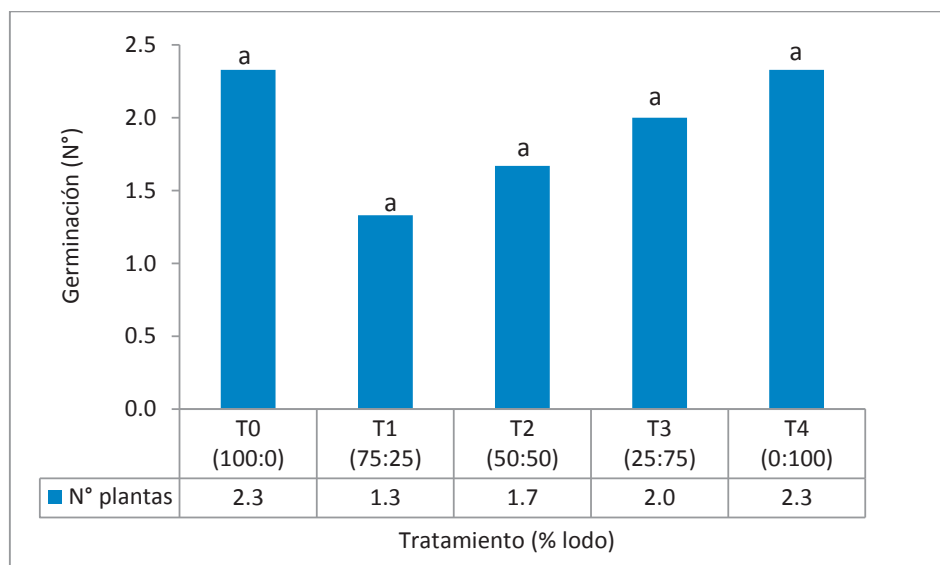


Figura 15: Germinación (N°) de semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.), sembradas en mezclas de lodos residuales y suelo.

La aplicación de lodos residuales en el sustrato incrementó la germinación de las semillas de lechuga conforme aumenta la concentración (Figura 15), siendo este

incremento estadísticamente no significativo. Sin embargo, según Celis et al. (2006), se pudo observar un efecto beneficioso con la aplicación de lodos residuales al suelo, en todos los tratamientos (25, 50, 75, 100 y 150 Mg/ha), donde el índice de germinación fue superior al 80%, límite superior al cual el material no presenta fitotoxicidad, excepto el tratamiento de 150 Mg/ ha. Los tratamientos 50 Mg/ha, 100Mg/ha y 150 Mg/ha fueron significativamente diferentes al suelo testigo ($p < 0,05$).

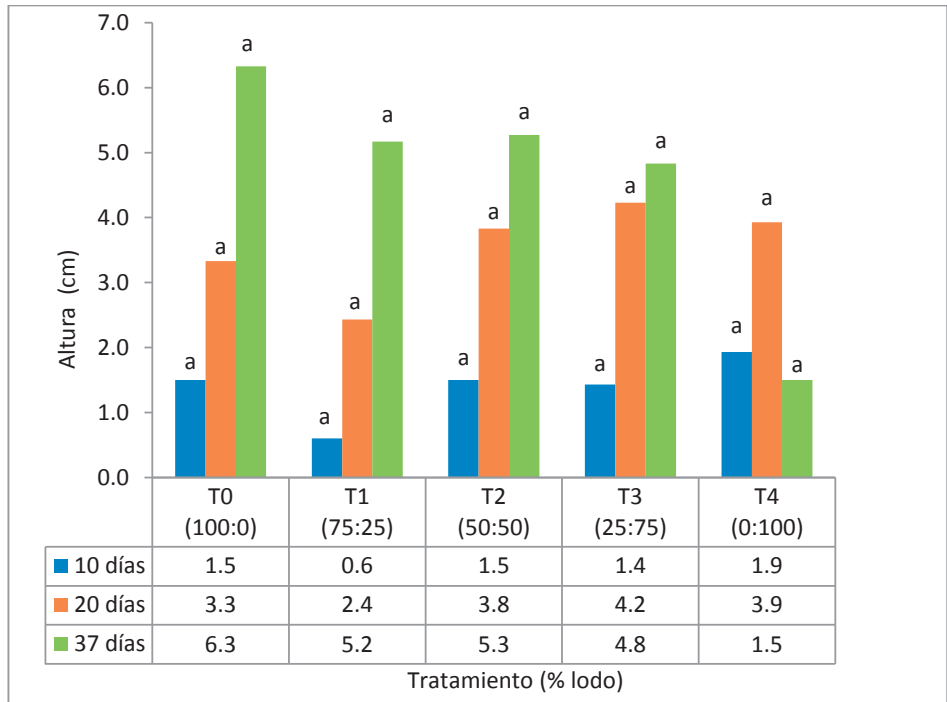


Figura 16: Altura de cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) durante 10, 20 y 37 días en las distintas mezclas de lodos residuales y suelo.

El uso de lodos residuales en todas las proporciones ensayadas, incrementó significativamente la altura de las plantas de lechuga a los 10 y 20 días después de la siembra, sin embargo a los 37 días no aumentó en la misma razón respecto al suelo testigo (Figura 16).

Según Celis et al. (2006) al igual que en la germinación de las semillas, la principal razón por la que se presentan variaciones en la altura de las plantas de lechuga, es la alta concentración de nutrientes, la cual inhibe a medida que aumenta la concentración de lodos residuales.



Figura 17: Cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) utilizando el tratamiento T0 (100:0) a los 20 días.



Figura 18: Cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) utilizando el tratamiento T4 (0:100) a los 20 días.



Figura 19: Cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) utilizando el tratamiento T0 (100:0) a los 37 días.



Figura 20: Cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) utilizando el tratamiento T4 (0:100) a los 37 días.

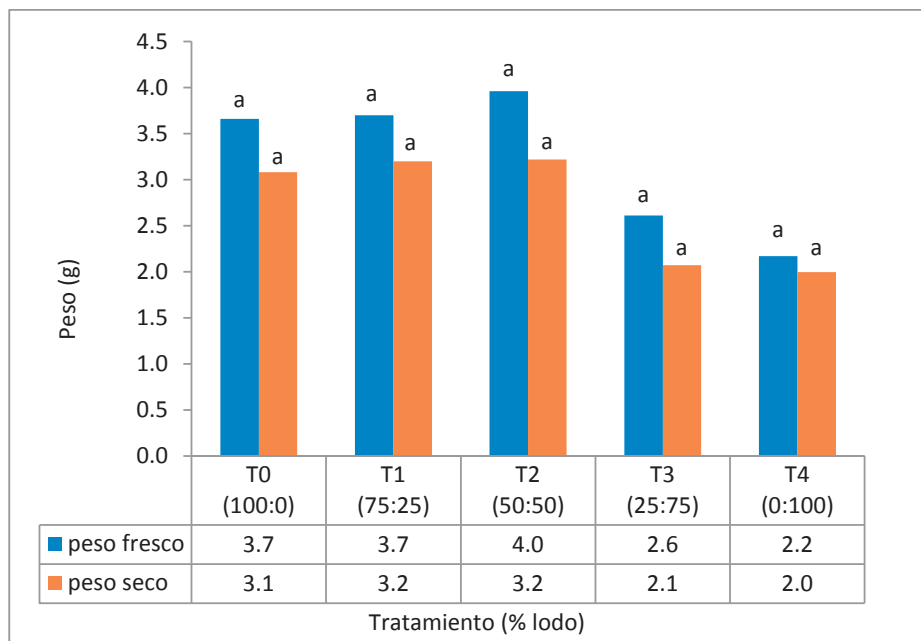


Figura 21: Biomasa de las plantas del lechuga (*Lactuca sativa* L.) durante su crecimiento en las distintas mezclas de lodos residuales y suelo.

En la Figura 21, se observa que la aplicación de lodos residuales en el sustrato, incrementó la producción de biomasa con respecto al registrado en el suelo testigo, en los tratamientos T1 (75:25) y T2 (50:50), sin embargo no existe diferencias significativas en los tratamientos.

6.3.4 CULTIVO RABANO (*Raphanus sativus* L.)

a. Germinación, altura de la planta a los 10 y 20 días y producción de biomasa.

Tabla 13: Efecto de la proporción de lodos residuales sobre el número de plantas germinadas, la altura a los 10 y 20 días después de la siembra (dds) y la producción de biomasa de plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.).

Tratamiento	Proporción suelo:lodos	N° plantas germinadas	Altura de planta		Peso fresco	Peso seco
			10 dds	20 dds		
T ₀	100:0	3.7 a	8.5 a	12.3 a	7.3 a	4.9 a
T ₁	75:25	5.0 a	7.6 a	10.7 a	7.2 a	5.0 a
T ₂	50:50	4.7 a	6.9 a	7.8 a	6.2 a	4.8 a
T ₃	25:75	3.0 a	4.4 a	5.7 a	4.3 a	3.3 a
T ₄	0:100	4.0 a	7.6 a	9.7 a	6.3 a	4.9 a

Los valores son promedio de tres repeticiones. Medias de tratamientos dentro de una columna seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes ($P < 0.05$), de acuerdo a la prueba HSD de Tukey.

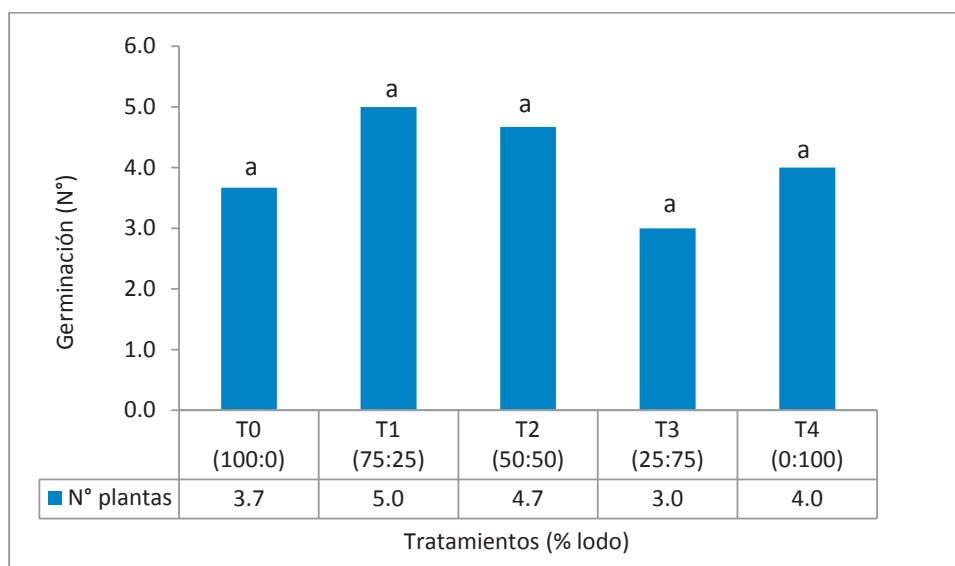


Figura 22: Germinación (N°) de semillas de rábano (*Raphanus sativus* L.), sembradas en mezclas de lodos residuales y suelo.

La aplicación de lodos residuales en el sustrato incrementó la germinación de las semillas de rábano en los tratamientos T1 (75:25), T2 (50:50) y T4 (0:100) respecto al registrado en el suelo testigo (Figura 22), siendo este incremento estadísticamente

no significativo. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Ramírez et al. (2006), sin embargo los valores registrados fueron estadísticamente significativos, lo cual se puede deber al método aplicado.

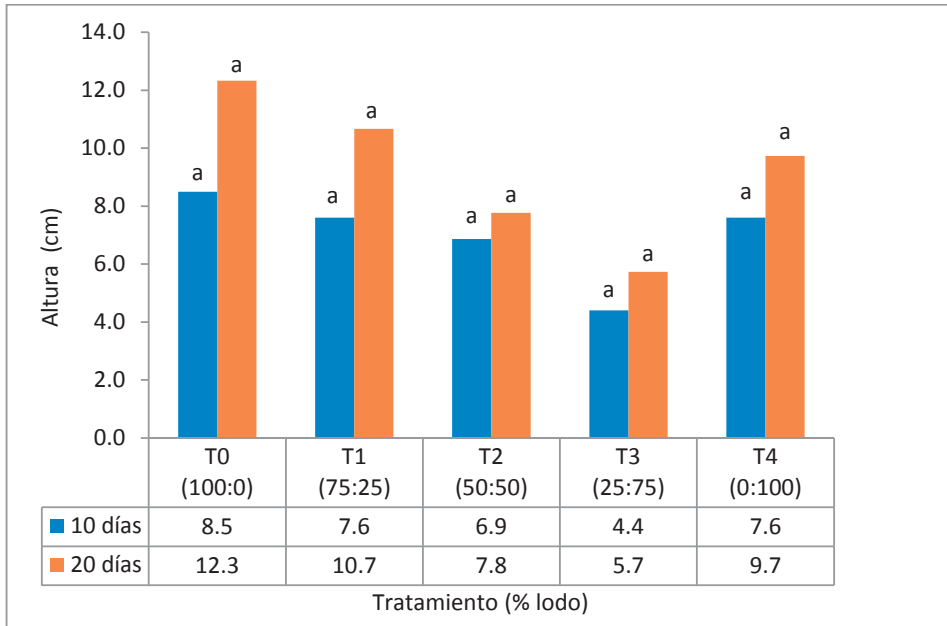


Figura 23: Altura del rábano (*Raphanus sativus* L.) durante 10 y 20 días en las distintas mezclas de lodos residuales y suelo.

En la Figura 23 se muestra que, el uso de lodos residuales en todas las proporciones ensayadas disminuyó la altura de las plantas de rábano a los 10 y 20 días después de la siembra. La razón por la cual presentó un retraso en el crecimiento, se debió a la baja concentración de potasio en los lodos residuales (0.47 ppm) y suelo (592 ppm). Sin embargo, de acuerdo al estudio de Ramírez et al. (2006), los datos registrados evidenciaron un incremento constante en los distintos tratamientos para un periodo de tiempo de 35 días.



Figura 24: Cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.) utilizando el tratamiento T0 (100:0) a los 10 días.



Figura 25: Cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.) utilizando el tratamiento T3 (25:75) a los 10 días.

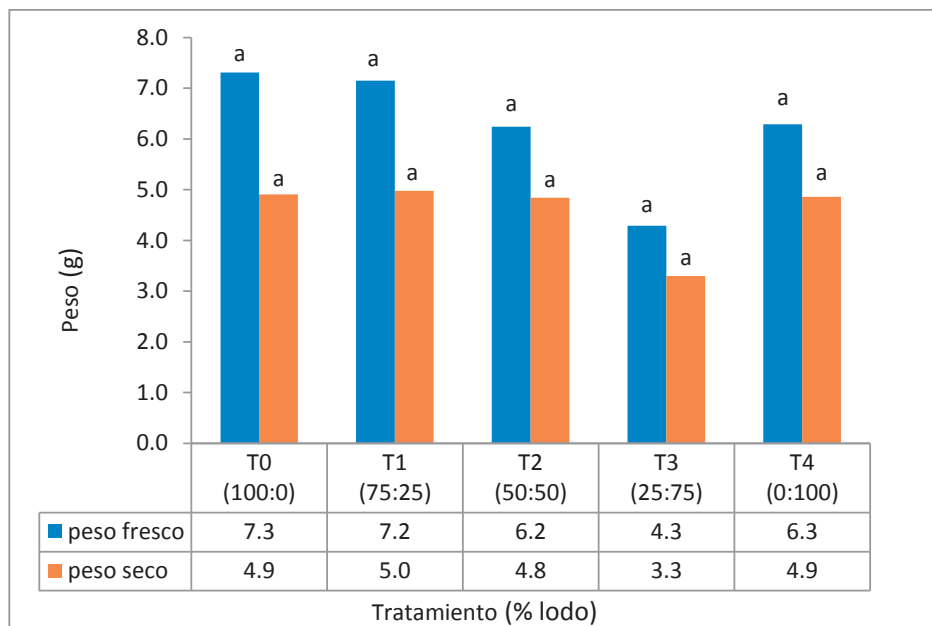


Figura 26: Biomasa de las plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.) durante su crecimiento en las distintas mezclas de lodos residuales y suelo.

La aplicación de lodos residuales en el sustrato, disminuyó la producción de biomasa de rábano en el tratamiento T3 (25:75), respecto al registrado en el suelo testigo (Figura 26), siendo esta disminución estadísticamente no significativa. Sin embargo, de acuerdo al estudio de Ramírez et al. (2006), el peso seco total de las plantas presentó un incremento constante en los distintos tratamientos para un periodo de tiempo de 35 días, siendo significativamente diferentes.

6.4 ANÁLISIS DE BIOACUMULACIÓN DE METALES PESADOS (CADMIO)

Se realizó el análisis de concentración de cadmio en las muestras de tres cultivos indicadores (frijol, maíz y rábano) en el laboratorio de Análisis de Suelos Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina (LASPAF-UNALM). El informe de análisis foliar se presenta en el Anexo N°5. ¹

¹ No se realizó el análisis de la concentración de cadmio en las hojas de lechuga, debido a que no se obtuvo un crecimiento adecuado de la planta.

En la Tabla 14, se presentan los resultados de los análisis de bioacumulación de metales pesados (cadmio), en las hojas de las plantas de maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y rábano (*Raphanus sativus* L.), en las diferentes proporciones de lodo residual utilizado.

Tabla 14: Bioacumulación de metales pesados, Cd (mg/kg) en las hojas de las plantas de maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y rábano (*Raphanus sativus* L.) después del crecimiento.

Tratamiento	Concentración de Cd (mg/kg)			
	Proporción suelo:lodos	Maíz	Frijol	Rábano
T ₀	100: 0	0.68	0.33	3.48
T ₁	75:25	0.26	0.33	2.62
T ₂	50:50	0.36	0.26	4.50
T ₃	25:75	0.20	0.10	5.58
T ₄	0:100	0.54	0.70	2.70

Fuente: LASPAF-UNALM

En el caso del cultivo de maíz, los resultados indican que la concentración de cadmio absorbido por la planta, aumenta conforme aumenta el porcentaje de lodos, sin embargo el tratamiento T3 (25:75) presenta el menor valor. El tratamiento sin lodos residuales, presentó altas concentraciones de cadmio por encima de las concentraciones encontradas con lodo residual.

En el cultivo de frijol, podemos observar la concentración de cadmio absorbido por la planta, disminuye conforme aumenta el porcentaje de lodos residuales, sin embargo en el tratamiento T4 (0:100) ocurre lo contrario.

Para el caso del cultivo de rábano, los valores aumentan de manera directa en relación a la concentración de lodo, sin embargo se obtuvo los menores valores en lo tratamiento T1 (75:25) y T4 (0:100). Por otro lado, el suelo testigo presentó altas concentraciones, debido a que posiblemente el suelo presente metales pesados de manera natural.

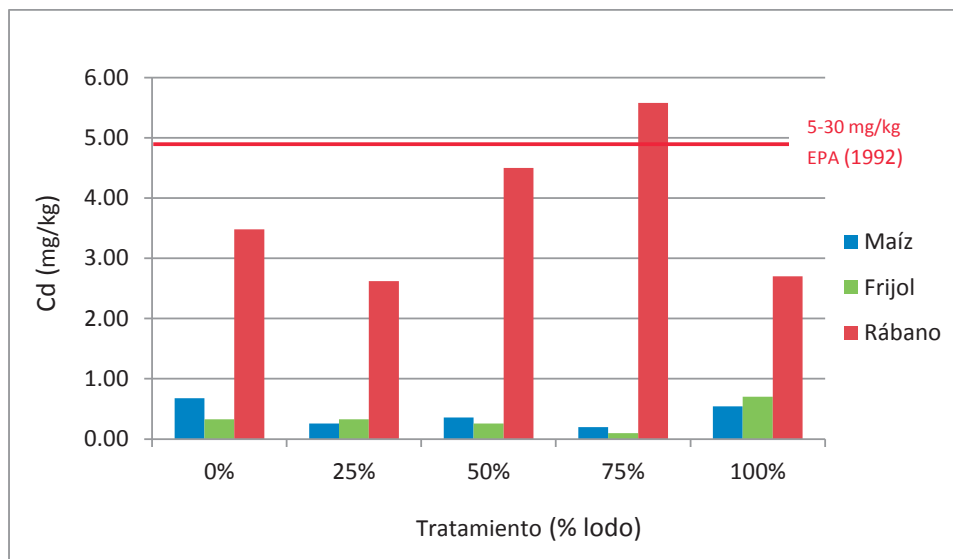


Figura 27: Concentración de Cd (mg/kg) en el follaje de plantas de maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y rábano (*Raphanus sativus* L.).

En la Figura 27, se muestra la concentración de cadmio en los distintos tratamientos para los tres cultivos, la cual se compara con el rango reportado por la EPA (1992) donde se establecen niveles de 5-30 mg/kg en las plantas, catalogándolo como excesivamente fitotóxico (ver Tabla 8). La bioacumulación de cadmio en el cultivo de maíz y frijol son semejantes a los encontrados en las muestras controles, lo cual hace suponer que la aplicación de lodos residuales no afecta en forma alguna el equilibrio de este metal entre la mezcla suelo-lodos y la solución del suelo cumpliendo con el rango de la norma en las diferentes proporciones de lodo, sin embargo para el cultivo de rábano ésta presenta mayores concentraciones de cadmio que las muestras de maíz y frijol en T1, T2 y T4, las cuales están por debajo del rango de la norma. Por otro lado, la muestra T3 excede dicho rango, lo cual hace suponer que la aplicación de lodo residual podría afectar al cultivo.

Estos resultados se deben principalmente a la gran cantidad de materia orgánica presente en el biosólido, que hace que exista una alta reactividad química, debido a la gran diversidad de grupos funcionales que contiene (Ramírez et al., 2006).

6.5 CUANTIFICACIÓN DE COLIFORMES FECALES Y TOTALES EN EL SUSTRATO

Luego de haber realizado el proceso de los cuatro cultivos indicadores, se llevó a analizar el contenido de coliformes fecales y totales que contenían los sustratos. A continuación, en la Tabla 15, se muestran los resultados del laboratorio de Ecología Microbiana y Biotecnología “Marino Tabusso”.

Tabla 15: Concentración de coliformes fecales y totales en el sustrato.

Tratamiento	Proporción suelo: lodos	Coliformes totales (NMP/g)	Coliformes fecales (NMP/g)
T ₀	100:0	27 x 10 ⁰	<3
T ₁	75:25	14 x 10 ¹	<3
T ₂	50:50	21 x 10 ²	<3
T ₃	25:75	23 x 10 ²	9
T ₄	0:100	12 x 10 ²	<3

Fuente: Laboratorio "Marino Tabusso".

Luego de haber analizado la concentración de coliformes fecales en el suelo en los diferentes tratamientos, se registraron valores desde menor al límite de detección (<3 NMP/g) en los tratamientos T₀, T₁, T₂ y T₄ hasta 9 NMP/g en el tratamiento T₃. Todos los tratamientos se clasifican como clase A (coliformes fecales < 1.000 NMP/g de lodo) según la Norma 503 de la EPA.

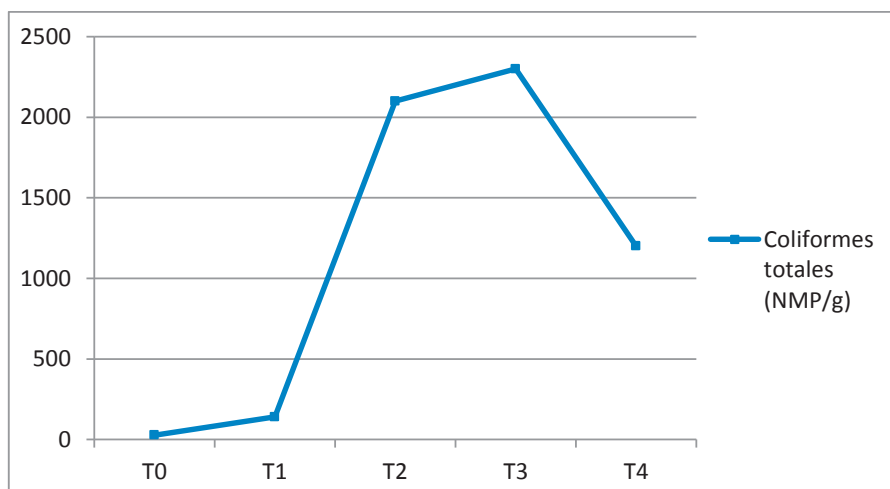


Figura 28: Concentración de coliformes totales (NMP/g) en el sustrato.

En la Figura 28, se muestra la cantidad de coliformes totales en los distintos tratamientos. Se registraron valores desde 27 NMP/g en el tratamiento T0 o control hasta 23×10^2 NMP/g en el tratamiento T3 (25:75). Los valores muestran un aumento, conforme aumenta la población, sin embargo para el tratamiento T4 (0:100) la concentración disminuyó. Esto puede deberse a la falta de adaptación de estas poblaciones a las condiciones del suelo y a los procesos de interacción y competencia a los que se enfrentan con la comunidad microbiana endémica (López et al., 2010).

VII. CONCLUSIONES

Luego de haber analizado la aplicación de lodos residuales como sustrato, se determinó que su uso aporta beneficios en el desarrollo de los cultivos de maíz y frijol, sin embargo no resultó para los otros cultivos.

En el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), tanto la germinación como el crecimiento de la planta, se favorecen con la aplicación de lodos residuales, en los tratamientos T1, T2, T3 y T4, los cuales prácticamente duplicaron los valores del suelo testigo a los 20 días de la siembra.

En el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), el tratamiento T3 es adecuado para el desarrollo del cultivo, ya que la germinación como las variables que evidencian el crecimiento y desarrollo de la planta (longitud y biomasa), se favorecen con la concentración de lodos residuales. Por otro lado, no se encontró un estudio similar para realizar la comparación, como en los otros cultivos.

En el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.), la sensibilidad en las pruebas de germinación de este estudio, y los antecedentes obtenidos de los estudios similares indicados en la bibliografía, revelan que esta especie es inhibida a medida que aumenta la concentración de lodos residuales, debido a sus altos contenidos de nutrientes, de acuerdo a los valores obtenidos en la altura y biomasa.

En el cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.), los resultados obtenidos indican que el uso de lodos residuales no son favorables para el desarrollo de la planta, a diferencia de resultados obtenidos en estudios similares, lo cual no permite aseverar que la aplicación de lodos es beneficioso para el cultivo, dejando abierto para que sea verificado en estudios futuros.

La bioacumulación de cadmio en los cultivos de maíz y frijol cumplen con el valor establecido en plantas por la EPA (1992), sin embargo en el cultivo de rábano en el

tratamiento T3 no cumple, debido a que este último tiene mayor capacidad de acumulación de cadmio. La capacidad de las plantas para bioacumular metales y otros posibles contaminantes varía, según la especie vegetal y la naturaleza de los contaminantes.

De acuerdo a la cantidad de coliformes fecales que contienen los lodos residuales, presenta restricciones para su aprovechamiento agrícola, para lo cual es necesario realizar procesos adicionales para la reducción de patógenos o puede ser utilizado en revegetación, cultivos de alimentos que se procesen antes de ser consumidos o cobertura de relleno sanitario.

La aplicación de los lodos residuales, como abono orgánico dependiendo de su concentración, incide directamente en el crecimiento y desarrollo de las plantas, asimismo ofrece una solución económica y la disposición final de estos.

VIII. RECOMENDACIONES

- Analizar otros parámetros físico-químicos, microbiológicos para poder evaluar con mayor detalle el efecto de la aplicación de lodos residuales sobre el suelo con fines agrícolas.
- Se debe tener en cuenta al momento de la siembra de la lechuga, realizar almácigos y después trasplantarlos, para favorecer la germinación y el desarrollo de la planta.
- Para hacer uso de los lodos residuales directamente al suelo, deben pasar por un proceso de trituración, debido a la dureza que presenta.

IX. BIBLIOGRAFÍA

Publicaciones

- Acosta, Y., Ramírez, E. y Gutiérrez E. (n.d.). Efectos de la aplicación del lodo residual municipal sobre suelos y plantas. Venezuela. Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsaidis/aresidua/peru/ventar006.pdf>. Consultado 15 de septiembre de 2011.
- Altamirano, M. y Cabrera, C. (2006). Estudio comparativo para la elaboración de compost por técnica manual. Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Metalcienc. geogr, enero/junio 2006, vol.9, no.17, pp.75-84. ISSN 1561-0888. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-08882006000100010. Consultado 10 de octubre de 2011.
- Álvarez, L. (2004). Mineralización in vitro de nitrógeno y fósforo y contenido de metales pesados en suelos acondicionados con lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas servidas. Tesis Ing. Agr. Universidad de Chile. Escuela de Agronomía. Consultado 05 de septiembre de 2011. Disponible en: http://www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2004/alvarez_l/sources/alvarez_l.pdf.
- Caldera, Y., Gutiérrez, E., Blanco, E., Torres, M. y Gutiérrez, E. (2007). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de lodo residual como acondicionador de suelo durante el crecimiento de un cultivo de Cebollín (*Allium fistulosum* L.) Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. Vol. 15, N°3. ISSN 1315-2076.
- Celis, J., Sandoval, M., Zagal, E. y Briones, M. (2006). Efecto de la adición de biosólidos urbanos y de salmonicultura sobre la germinación de semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un suelo patagónico. Universidad de Concepción. Temuco, Chile. Vol. 6, N°3. pp 13-25.

- EPA/832-F-00-064. United States Environmental Protection Agency. (2000). Folleto informativo de tecnología de biosólidos. Aplicación de biosólidos al terreno. Consultado 08 de septiembre de 2011. Disponible en: http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2003_07_30_mtb_cs-00-064.pdf
- EPA/832-B-93-005. United States Environmental Protection Agency. (1995). A guide to the biosolids risk assessments for the EPA Part 503 Rule. Disponible en: http://water.epa.gov/scitech/wastetech/biosolids/503rule_index.cfm. Consultado 08 de septiembre de 2011.
- EPA/625/10-84-003. United States Environmental Protection Agency. (1984). Use and disposal of municipal wastewater sludge, Environmental Regulations and Technology.
- EPA/600/4-91/029. United States Environmental Protection Agency. (1992). Guide to site and soil description for hazardous waste site characterization. Vol. 1: metals. Washington.
- Falcón, E (2005). Producción de compost a partir de lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales Covicorti de SEDALIBSA- Trujillo. Tesis Ing. Agríc. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima. pp. 113.
- FAO (1997). Descripción de Perfiles de Suelos. 2da edición. Roma. Disponible en: http://edafologia.ugr.es/programas_suelos/practclas/taxoil/comun/consist.htm
- Hernández, A (2011). Determinación de metales pesados en suelos de Natividad, Ixtlán de Juárez Oaxaca. Tesis Lic. Ciencias Ambientales. Universidad de la Sierra Juárez, Oaxaca. pp. 78.
- Lima, J.A., Nahas, E. y Gomes, A.C. (1995). Microbial populations and activities in sewage sludge and phosphate fertilizer-amended soil. Applied Soil Ecology 4 (1996). pp. 75 - 82.

- López, I., Acevedo, D. y Ordóñez, C. (2010). Seguimiento a patógenos presentes en biosólido empleado como enmienda para revegetalizar. *Revista Ingenierías. Universidad de Medellín, Colombia*. Vol 9, N°17. pp. 29-40.
- Manrique, H. y Orellana, A. (2009). Guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en El Salvador. Tesis Ing. Civil. Universidad de El Salvador, San Salvador. pp. 246.
- Morral, F. y Molera, P. (1992). *Metalurgia General*. España: Reverté S.A. Consultado 08 de septiembre de 2011. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/choussy_c_d/apendiceC.pdf
- Norma 40 CFR parte 503 Rule: Standard for The Use or Disposal of Sewage Sludge. *Electronic Code o Federal Regulations*. (1993). Disponible en: http://water.epa.gov/scitech/wastetech/biosolids/503pe_index.cfm. Consultado 08 de septiembre de 2011.
- Qasim, M., Javed, N., Himayatullah y Subhan, M. (2001). Effect of Sewage Sludge on the Growth of Maize Crop. *Universidad Gomal. D.I.Khan, Pakistan*. Vol. 1, N°2. pp. 52-54.
- Pajuelo, D. (2006). Reciclaje de lodos residuales de la industria de papel mediante la técnica de compostaje. Tesis Ing. Ambiental. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima. pp. 97.
- Ramírez R. y Pérez M. (2006). Evaluación del potencial de los biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y su efecto sobre el cultivo de rábano rojo (*Raphanus sativus* L.). *Universidad Nacional de Colombia, Medellín*. Vol. 59, N°2. pp. 3543-3556.
- Sepúlveda, F., Tapia, F. y Ardiles, S. (2010). Beneficios de la materia orgánica en los suelos. Instituto de investigaciones agropecuarias (INIA). Informativo N°23

Arica – Chile. Consultado 27 de septiembre de 2011. Disponible en:
http://www.inia.cl/ururi/docs/Informativo_INIA-URURI_23.pdf.

Revistas

- Carrasco, J., Squella, F. y Undurraga, P. (2002). Prácticas para el manejo sustentable de los recursos naturales en la recuperación de los suelos degradados. Centro Regional de Investigación Rayentué. Instituto de investigaciones agropecuarias (INIA). Serie Actas N°16. ISSN 0717-4810. Chile. pp. 19-32.
- Linden, D. R., Larson, W. E., Dowdy, R.H. y Clapp, C.E. (1995). Agricultural utilization of sewage sludge. A twenty year study at the Rosemount agricultural experiment station University of Minnesota. Station Bulletin 606-1995.
- Paz Castro, C., Henríquez, O. y Freres, R. (2007). Posibilidades de aplicación de lodos o biosólidos a los suelos del sector norte de la Región Metropolitana de Santiago. Revista de Geografía Norte, 37:35-45. Chile.
- Torres, P., Madera, C. y Silva, J. (2009). Mejoramiento de la calidad microbiológica de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. Revista EIA, ISSN 1794-1237 N°11. Escuela de Ingeniería de Antioquía. Medellín. pp. 21-37.

Libros

- Andreoli, C. V., Lara, A. I. y Fernández, F. (1999). Reciclagem de biosólidos. Transformando problemas em soluções. Companhia de Saneamento do Paraná SANEPAR. Ministério de Ciência y Tecnologia, FINEP, CNPq y CAPES (eds). Brasil. pp. 300, citado por Torres et. al., 2009.
- Bazán, L. R. (1996). Manual para el análisis químico. Fundación Perú – Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima – Perú.

- Blair, E. (1957). Manual de riegos y avenamientos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la Organización de los Estados Americanos. Zona Andina. Proyecto 39- Programa de Cooperación Técnica. Turrialba, Costa Rica. pp. 364.
- Carrillo, R. (1998). Simposia. Memorias IV Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente. Volumen II. Equinoccio Ediciones de la Universidad Simón Bolívar. Venezuela. pp. 333.
- Casanova, E. (2005). Introducción a la ciencia del suelo. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad Central de Venezuela. pp 487.
- De Melo, J. (2001). Uso de biosólido na agricultura, São Paulo, Brasil, citado por Falcón, 2005.
- Elliot, H., y Singer, L.M. (1987). Effect water treatment sludge on growth and elemental compositions of tomato (*Lycopersicon esculentum*) shoots. Commun. Soil Science Plant Anal., 19 (3): 345-354.
- ICMFS. (2000). Microorganismos de los alimentos. Volumen I, su significado y método de enumeración. Segunda edición. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza – España, citado por Pajuelo, 2006.
- Jiménez, B. (2001). La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. Ed. Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA. México. pp 926. ISBN: 6042-X.
- Lockhart, I. y Gomez, V. (2009). Cambio climático- plan de acción Buenos Aires 2030. Gobierno Ciudad de Buenos Aires.
- Organización Panamericana de la Salud-OPS (1988). Guías para la calidad del agua potable. Volumen 3. Publicación científica N° 508. Washington, D.C.

- Orozco, A. (2005). Bioingeniería de aguas residuales. Teoría y diseño. Acodal.
- Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB). (1999). Gerenciamento do lodo de Lagoas de Estabilização não Mecanizadas. Rio de Janeiro. Brasil, citado por Falcón, 2005.
- R Core Team. (2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL. <http://www.R-project.org/>.
- Richards (1954). Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. US. Salinity Laboratory. US. Dept. Agric. Handbook. N° 60. Estados Unidos.
- Roberts, D., Hoper, W. y Greenwood, M. (1995). Microbiología de los alimentos. Método para el examen de microorganismos de los alimentos de interés para la salud pública. Reino Unido. Traducido por Sanz, E. y Sanz, B. Editorial Acribia S.A. Zaragoza- España. 2000, citado por Pajuelo, 2006.
- Romero, R. (2007). Microbiología y parasitología humana. Bases etiológicas de las enfermedades infecciosas y parasitarias 3ª Edición. Editorial Médica Panamericana. México. pp. 751-772.
- Sabey, B.R. (1980). The use of sewage sludge as a fertilizer. In: M.W.M. Bewick (Editor), Handbook of Organic Waste Conversion. Van Nostrand Reinhold, Netherlands. pp. 72-107.
- Seoáñez, M. (2000). Tratado de reciclado y recuperación de productos de los residuos. Ediciones Mundi- Prensa. Madrid.
- Sopper, W. E. (1993). Municipal sludge use in land reclamation. S.1: Lewis Publishers.